

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE

Orientamento in INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO



BLOCCO FISSO E BLOCCO MOBILE: ANALISI DELLA CAPACITÀ E DELLA PROPAGAZIONE DEI RITARDI

Relatore:

Prof. Ing. Roberto Maja

Autori:

Francesco Moraglia 767185

Federico Pocetti 767175

Anno Accademico 2011 - 2012

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	5
INDICE DELLE TABELLE	7
INDICE DEI GRAFICI	10
INDICE DEGLI ALLEGATI	15
1 INTRODUZIONE	16
2 TECNICHE DI DISTANZIAMENTO	19
2.1 Blocco Fisso	20
2.1.1 Blocco Automatico a Correnti Codificate - BACC.....	23
2.1.2 ERTMS Livello 2	25
2.2 Blocco Mobile.....	26
2.2.1 Tempi tecnici.....	27
2.2.2 Franco di sicurezza	27
2.2.3 ERTMS Livello 3	28
3 METODI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ DELLE LINEE FERROVIARIE	29
3.1 Premessa	29
3.2 RFI.....	30
3.2.1 Osservazioni	31
3.3 Poggio.....	32
3.3.1 Confronto tra Blocco Fisso e Blocco Mobile con il modello di Poggio.....	33
3.3.2 Osservazioni	36
3.4 UIC CODE 406.....	37
3.4.1 Introduzione.....	37
3.4.2 Parametri alla base della capacità	38
3.4.3 Calcolo del consumo di capacità.....	39
3.4.4 Tempo di blocco della singola sezione di blocco	43

3.4.5	Metodo di calcolo	44
3.4.6	Processo applicativo.....	46
3.4.7	Valori tipici di occupazione dell'infrastruttura	47
3.5	Rappresentazione grafica della capacità	47
3.5.1	Numero di treni.....	49
3.5.2	Velocità media	49
3.5.3	Stabilità	50
3.5.4	Eterogeneità.....	50
3.5.5	Consumo di capacità	51
4	TEORIA DELLA PROPAGAZIONE DEI RITARDI.....	52
4.1	Premessa	52
4.1.1	Analisi del fenomeno di propagazione di una perturbazione.....	53
4.2	Metodo UIC di inserimento e valutazione dei ritardi	57
4.2.1	Ritardi statistici	58
4.2.2	Ritardi primari	58
4.2.3	Risultati	58
4.3	Adattamento del protocollo UIC al caso di studio	59
5	TRAZIONE ELETTRICA.....	61
5.1	Caratteristica meccanica	61
5.1.1	Caratteristica meccanica ideale	61
5.1.2	Caratteristica meccanica dei motori ad induzione	64
5.2	Resistenze al moto	65
5.3	Fasi del moto	66
5.3.1	Avviamento	66
5.3.2	Moto a regime.....	67
5.3.3	Lancio	67

5.3.4	Frenatura.....	68
5.3.5	Diagramma di trazione.....	68
5.4	Materiale rotabile	69
5.4.1	Treno Suburbano	69
5.4.2	Treno Eurocity.....	70
5.4.3	Treno Alta Velocità.....	71
6	SOFTWARE	73
6.1	Modellizzazione del diagramma di trazione	73
6.2	Modellizzazione della traccia imperturbata	75
6.3	Modellizzazione dell'occupazione dell'infrastruttura.....	77
6.3.1	Blocco Fisso	77
6.3.2	Blocco Mobile.....	79
6.4	Compattazione delle tracce	79
6.4.1	Blocco Fisso	80
6.4.2	Blocco Mobile.....	82
6.4.3	Calcolo degli altri risultati di capacità	86
6.5	Modellizzazione della propagazione dei ritardi	87
6.5.1	Blocco Fisso	87
6.5.2	Blocco Mobile.....	89
6.5.3	Calcolo degli altri risultati della propagazione dei ritardi.....	93
7	STUDIO DELLA CAPACITÀ DI SCENARI IDEALI	94
7.1	Linea Suburbana.....	95
7.1.1	Blocco Fisso	96
7.1.2	Blocco Mobile.....	109
7.1.3	Confronto	122
7.1.4	Potenziamento del Blocco Fisso	127

7.2	Linea ad Alta Velocità.....	129
7.2.1	Blocco Fisso	130
7.2.2	Blocco Mobile.....	145
7.2.3	Confronto	157
7.2.4	Potenziamento del Blocco Fisso	164
7.3	Linea Tradizionale	167
7.3.1	Blocco Fisso	168
7.3.2	Blocco Mobile.....	189
7.3.3	Confronto	205
7.3.4	Potenziamento del Blocco Fisso	211
8	STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEI RITARDI DI SCENARI IDEALI	215
8.1	Linea Suburbana.....	215
8.1.1	Blocco Fisso	215
8.1.2	Blocco Mobile.....	221
8.1.3	Confronto	227
8.2	Linea ad Alta Velocità.....	228
8.2.1	Blocco Fisso	229
8.2.2	Blocco Mobile.....	236
8.2.3	Confronto	244
8.3	Linea Tradizionale	246
8.3.1	Blocco Fisso	247
8.3.2	Blocco Mobile.....	252
8.3.3	Confronto	257
9	CONCLUSIONI.....	259
10	BIBLIOGRAFIA.....	262
11	SITOGRAFIA.....	264

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1.1: Segnalamento a tre aspetti.....	20
Figura 2.1.2: Distanziamento minimo teorico nel Blocco Fisso con segnalamento a tre aspetti	21
Figura 2.1.3: Distanziamento minimo pratico nel Blocco Fisso con segnalamento a tre aspetti	22
Figura 2.1.4: Funzionamento di della ripetizione dei segnali in macchina	23
Figura 2.1.5: Trasmissione discontinua delle informazioni tramite Balise	24
Figura 2.1.6: Trasmissione continua delle informazioni tramite GSM-R e Blocco Radio	25
Figura 2.2.1: Distanziamento minimo pratico nel Blocco Mobile.....	27
Figura 2.2.2: Trasmissione continua delle informazioni tramite GSM-R e Blocco Mobile.....	28
Figura 3.4.1: Esempio di rappresentazione grafica della capacità secondo l’UIC.....	39
Figura 3.4.2: Esempio di orario grafico originale	40
Figura 3.4.3: Procedura di compressione dell’orario grafico	41
Figura 3.4.4: Principio di calcolo della sovrapposizione del tempo di blocco.....	42
Figura 3.4.5: Composizione del tempo di blocco di una sezione.....	44
Figura 3.4.6: Determinazione del consumo di capacità e della capacità inutilizzata.....	45
Figura 3.5.1: Rappresentazione grafica della capacità proposta da Landex.....	48
Figura 3.5.2: Esempio di rappresentazione grafica della capacità.....	49
Figura 4.1.1: Cono di influenza della perturbazione	53
Figura 4.1.2: Cono di influenza della perturbazione in assenza di margini di tempo	56
Figura 5.1.1: Caratteristica meccanica ideale teorica	62
Figura 5.1.2: Caratteristica meccanica ideale reale	63
Figura 5.1.3: Caratteristica meccanica dei motori ad induzione	64
Figura 5.1.4: regolazione elettronica di un motore ad induzione	65
Figura 5.3.1: Regolazione della coppia al variare delle resistenze al moto	67
Figura 6.2.1: Traccia imperturbata - diagramma di flusso	75
Figura 6.2.2: Traccia imperturbata linee AV - diagramma di flusso.....	76
Figura 6.3.1: Tempo di inizio occupazione della sezione di blocco - diagramma di flusso	78
Figura 6.4.1: Intervallo minimo tra due treni - Blocco Fisso - diagramma di flusso.....	80
Figura 6.4.2: Massimo numero di treni e tempo di occupazione dell'infrastruttura - Blocco Fisso - diagramma di flusso	81
Figura 6.4.3: Intervallo minimo tra due treni - Blocco Mobile - diagramma di flusso	83
Figura 6.4.4: Massimo numero di treni e tempo di occupazione dell'infrastruttura - Blocco Mobile - diagramma di flusso.....	85
Figura 6.5.1: Traccia treno generico con possibile perturbazione della marcia - Blocco Fisso - diagramma di flusso	88
Figura 6.5.2: Traccia treno generico con possibile perturbazione della marcia - Blocco Mobile - diagramma di flusso ..	90

Figura 6.5.3: Progressiva a cui si trova il treno in un dato tempo	91
Figura 6.5.4: Tempo in cui il treno si trova ad una data progressiva	92
Figura 7.1.1: Schematizzazione della linea Suburbana	95
Figura 7.1.2: Variazione del distanziamento in funzione dell'accelerazione	114
Figura 7.2.1: Schematizzazione della linea ad Alta Velocità	129
Figura 7.2.2: Step di decelerazione - linea AV - Blocco Fisso	131
Figura 7.2.3: Dettaglio dei tempi di occupazione delle sezioni prossime alla stazione - linea AV - Blocco Fisso	137
Figura 7.2.4: Minimo distanziamento pratico - linea AV - Blocco Fisso	158
Figura 7.2.5: Minimo distanziamento pratico - linea AV - Blocco Mobile	159
Figura 7.3.1: Schematizzazione della linea tradizionale	167
Figura 7.3.2: Compattazione delle tracce - linea tradizionale - Blocco Fisso	171
Figura 7.3.17: Tempo recuperabile con l'adozione del Blocco Mobile in una linea tradizionale	191
Figura 7.3.18: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile	193
Figura 8.3.1: Diversità del numero di treni coinvolti in funzione del primo treno affetto da ritardo	246

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.3.1: Lunghezza della sezione di blocco nel metodo di Poggio	33
Tabella 3.4.1: Valori tipici di occupazione dell'infrastruttura suggeriti dall'UIC	47
Tabella 4.2.1: Ritardi statistici in ingresso	58
Tabella 4.2.2: Ritardi statistici in corrispondenza delle fermate	58
Tabella 5.2.1: Resistenze in curva	66
Tabella 5.3.1: Valori limite e di servizio di accelerazione, decelerazione e velocità per la linea Suburbana.....	68
Tabella 5.3.2: Valori limite e di servizio di accelerazione, decelerazione e velocità per le linee AV e Tradizionale	69
Tabella 5.4.1: Caratteristiche del treno Suburbano.....	69
Tabella 5.4.2: Caratteristiche del treno Eurocity	70
Tabella 5.4.3: Caratteristiche treno AV.....	71
Tabella 7.1.1: Caratteristiche della linea Suburbana	95
Tabella 7.1.2: Tempi Tecnici – linea suburbana – Blocco Fisso.....	96
Tabella 7.1.3: Risultati della compressione dell’orario originale – linea suburbana – Blocco Fisso	97
Tabella 7.1.4: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea suburbana – Blocco Fisso	97
Tabella 7.1.5: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea suburbana - Blocco Fisso.....	98
Tabella 7.1.6: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea suburbana - Blocco Fisso.....	100
Tabella 7.1.7: Risultati al variare della lunghezza del treno di servizio - linea suburbana - Blocco Fisso	101
Tabella 7.1.8: Risultati al variare del tempo di fermata - linea suburbana - Blocco Fisso	102
Tabella 7.1.9: Risultati al variare della lunghezza delle sezioni di blocco - linea suburbana - Blocco Fisso.....	104
Tabella 7.1.10: Risultati al variare della potenza continuata - linea suburbana - Blocco Fisso	105
Tabella 7.1.11: Risultati al variare della velocità d'orario - linea suburbana - Blocco Fisso.....	106
Tabella 7.1.12: Tempi di blocco e Franco di sicurezza – linea suburbana – Blocco Mobile.....	110
Tabella 7.1.13: Risultati della compressione dell’orario originale – linea suburbana – Blocco Mobile.....	110
Tabella 7.1.14: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea suburbana– Blocco Mobile	111
Tabella 7.1.15: Risultati al variare del tempo tecnico - linea suburbana - Blocco Mobile.....	112
Tabella 7.1.16: Risultati al variare dell’accelerazione di servizio - linea suburbana - Blocco Mobile	113
Tabella 7.1.17: Risultati al variare della lunghezza del treno - linea suburbana - Blocco Mobile.....	115
Tabella 7.1.18: Risultati al variare del tempo di fermata - linea suburbana - Blocco Mobile.....	116
Tabella 7.1.19: Risultati al variare della potenza continuata - linea suburbana - Blocco Mobile	117
Tabella 7.1.20: Risultati al variare della velocità d'orario - linea suburbana - Blocco Mobile	117
Tabella 7.1.21: Risultati al variare del franco di sicurezza - linea suburbana - Blocco Mobile	119
Tabella 7.2.1: Caratteristiche della linea ad Alta Velocità	129
Tabella 7.2.2: Limiti di velocità - Linea AV	130
Tabella 7.2.3: Tempi tecnici – linea AV – Blocco Fisso	132

Tabella 7.2.4: Risultati della compressione dell'orario originale – linea AV – Blocco Fisso.....	132
Tabella 7.2.5: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea AV – Blocco Fisso	133
Tabella 7.2.6: Parametri considerati e loro valore nel caso di base – linea AV – Blocco Fisso	133
Tabella 7.2.7: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea AV - Blocco Fisso	134
Tabella 7.2.8: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea AV - Blocco Fisso	135
Tabella 7.2.9: Risultati al variare della lunghezza del treno - linea AV - Blocco Fisso.....	137
Tabella 7.2.10: Risultati al variare del tempo di fermata - linea AV - Blocco Fisso	139
Tabella 7.2.11: Risultati al variare della lunghezza delle sezioni di blocco - linea AV - Blocco Fisso	139
Tabella 7.2.12: Risultati al variare della potenza continuata - linea AV - Blocco Fisso	141
Tabella 7.2.13: Risultati al variare della velocità di servizio - linea AV - Blocco Fisso.....	141
Tabella 7.2.14: Tempi di blocco e Franco di sicurezza – linea AV – Blocco Mobile	146
Tabella 7.2.15: Risultati della compressione dell'orario originale – linea AV – Blocco Mobile	147
Tabella 7.2.16: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea AV – Blocco Mobile.....	147
Tabella 7.2.17: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea AV - Blocco Mobile.....	148
Tabella 7.2.18: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea AV - Blocco Mobile.....	149
Tabella 7.2.19: Risultati al variare della lunghezza dei treni - linea AV - Blocco Mobile	150
Tabella 7.2.20: Risultati al variare del tempo di fermata - linea AV - Blocco Mobile	151
Tabella 7.2.21: Risultati al variare della potenza continuata - linea AV - Blocco Mobile.....	152
Tabella 7.2.22: Risultati al variare della velocità d'orario - linea AV - Blocco Mobile.....	153
Tabella 7.2.23: Risultati al variare del franco di sicurezza - linea AV - Blocco Mobile.....	154
Tabella 7.2.24: Limiti di velocità - linea AV - Blocco Fisso Potenziato.....	165
Tabella 7.2.25: Contributo degli interventi eseguiti singolarmente e in contemporanea – linea AV – Blocco Fisso Potenziato.....	165
Tabella 7.3.1: Caratteristiche della linea tradizionale	167
Tabella 7.3.2: Limiti di velocità - Linea tradizionale.....	168
Tabella 7.3.3: Tempi tecnici – linea tradizionale – Blocco Fisso	169
Tabella 7.3.4: Risultati della compressione dell'orario originale – linea tradizionale – Blocco Fisso	169
Tabella 7.3.5: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea tradizionale – Blocco Fisso	170
Tabella 7.3.6: Parametri considerati e loro valore nel caso di base – linea tradizionale – Blocco Fisso.....	172
Tabella 7.3.7: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea tradizionale - Blocco Fisso.....	172
Tabella 7.3.8: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea tradizionale - Blocco Fisso.....	174
Tabella 7.3.9: Risultati al variare della lunghezza del treno - linea tradizionale - Blocco Fisso	175
Tabella 7.3.10: Risultati al variare del tempo di fermata - linea tradizionale - Blocco Fisso	176
Tabella 7.3.11: Risultati al variare della lunghezza delle sezioni di blocco - linea tradizionale - Blocco Fisso.....	177
Tabella 7.3.12: Risultati al variare della potenza continuata - linea tradizionale - Blocco Fisso	179
Tabella 7.3.13: Risultati al variare della velocità d'orario - linea tradizionale - Blocco Fisso	181
Tabella 7.3.14: Risultati al variare dei limiti di velocità - linea tradizionale - Blocco Fisso	182

Tabella 7.3.15: Risultati al variare della differenza tra le velocità dei due treni - linea tradizionale - Blocco Fisso	183
Tabella 7.3.16: Risultati al variare della distanza tra due posti di precedenza - linea tradizionale - Blocco Fisso.....	185
Tabella 7.3.17: Tempi di blocco e Franco di sicurezza – linea tradizionale – Blocco Mobile	189
Tabella 7.3.18: Risultati della compressione dell’orario originale – linea tradizionale – Blocco Mobile.....	190
Tabella 7.3.19: Risultati della compressione dell’orario portato a saturazione – linea tradizionale – Blocco Mobile ...	190
Tabella 7.3.20: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea tradizionale - Blocco Mobile	192
Tabella 7.3.21: Risultati al variare dell’accelerazione di servizio - linea tradizionale - Blocco Mobile	193
Tabella 7.3.22: Risultati al variare della lunghezza dei treni - linea tradizionale - Blocco Mobile	194
Tabella 7.3.23: Risultati al variare del tempo di fermata - linea tradizionale - Blocco Mobile	195
Tabella 7.3.24: Risultati al variare della potenza continuata - linea tradizionale - Blocco Mobile	197
Tabella 7.3.25: Risultati al variare della velocità d’orario - linea tradizionale - Blocco Mobile	198
Tabella 7.3.26: Risultati al variare del franco di sicurezza - linea tradizionale - Blocco Mobile	199
Tabella 7.3.27: Risultati al variare della differenza tra le velocità dei due treni - linea tradizionale - Blocco Mobile	200
Tabella 7.3.28: Risultati al variare della distanza tra due posti di precedenza - linea tradizionale - Blocco Mobile	201
Tabella 7.3.29: Contributo dell'intervento di potenziamento linea – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato	211
Tabella 7.3.30: Evoluzione della situazione base a due scenari alternativi: potenziamento della linea e BM – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato.....	212
Tabella 7.3.31: Contributo dell'intervento di miglioramento dell’accessibilità – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato.....	212
Tabella 7.3.32: Evoluzione della situazione base a due scenari alternativi: miglioramento dell’accessibilità e BM – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato.....	212
Tabella 7.3.33: Contributo degli interventi di potenziamento materiale rotabile applicati simultaneamente – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato.....	213
Tabella 7.3.34: Evoluzione della situazione base a due scenari alternativi: potenziamento caratteristiche meccaniche e BM – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato.....	213

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 3.3.1: Legame tra potenzialità della linea e velocità secondo Poggio.....	35
Grafico 5.4.1: Caratteristica meccanica del treno Suburbano	70
Grafico 5.4.2: Caratteristica meccanica del treno Eurocity	71
Grafico 5.4.3: Caratteristica meccanica del treno AV	72
Grafico 7.1.1: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso	99
Grafico 7.1.2: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso	100
Grafico 7.1.3: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso.....	101
Grafico 7.1.4: Legame tra tempo di fermata e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso	103
Grafico 7.1.5: Legame tra lunghezza delle sezioni di blocco e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso	104
Grafico 7.1.6: Legame tra potenza continuata e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso	105
Grafico 7.1.7: Legame tra velocità d'orario e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso	106
Grafico 7.1.8: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea suburbana – Blocco Fisso	107
Grafico 7.1.9: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea suburbana – Blocco Fisso..	109
Grafico 7.1.10: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile	112
Grafico 7.1.11: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile .	113
Grafico 7.1.12: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile	115
Grafico 7.1.13: Legame tra tempo di fermata e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile.....	116
Grafico 7.1.14: Legame tra velocità d'orario e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile.....	118
Grafico 7.1.15: Legame tra franco di sicurezza e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile	119
Grafico 7.1.16: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea suburbana – Blocco Mobile	120
Grafico 7.1.17: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea suburbana – Blocco Mobile	121
Grafico 7.1.18: Confronto al variare dei tempi tecnici - linea suburbana.....	123
Grafico 7.1.19: Confronto al variare dell'accelerazione di servizio - linea suburbana	123
Grafico 7.1.20: Confronto al variare della lunghezza del treno - linea suburbana	124
Grafico 7.1.21: Confronto al variare del tempo di fermata - linea suburbana	124
Grafico 7.1.22: Confronto al variare della potenza continuata - linea suburbana	125
Grafico 7.1.23: Confronto al variare della velocità d'orario - linea suburbana	125
Grafico 7.1.24: Variazione di capacità con il miglioramento dei parametri meccanici del materiale rotabile nel Blocco Fisso	127
Grafico 7.1.25: Varzione di capacità con il diminuire dei parametri propri del distanziamento a Blocco Fisso.....	128
Grafico 7.2.1: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso	134
Grafico 7.2.2: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso	136

Grafico 7.2.3: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso	138
Grafico 7.2.4: Legame tra lunghezza delle sezioni di blocco e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso	140
Grafico 7.2.5: Legame tra velocità di servizio e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso	142
Grafico 7.2.6: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea AV – Blocco Fisso	143
Grafico 7.2.7: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea AV – Blocco Fisso	145
Grafico 7.2.8: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile.....	148
Grafico 7.2.9: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile.....	149
Grafico 7.2.10: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile.....	150
Grafico 7.2.11: Legame tra tempo di fermata e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile	152
Grafico 7.2.12: Legame tra velocità d’orario e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile	153
Grafico 7.2.13: Legame tra franco di sicurezza e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile	154
Grafico 7.2.14: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea AV – Blocco Mobile.....	155
Grafico 7.2.15: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea AV – Blocco Mobile	156
Grafico 7.2.16: Confronto al variare dei tempi tecnici - linea AV	160
Grafico 7.2.17: Confronto al variare dell’accelerazione di servizio - linea AV	161
Grafico 7.2.18: Confronto al variare della lunghezza del treno - linea AV.....	161
Grafico 7.2.19: Confronto al variare del tempo di fermata in stazione - linea AV.....	162
Grafico 7.2.20: Confronto al variare della potenza continuata - linea AV	162
Grafico 7.2.21: Confronto al variare della velocità d’orario - linea AV	163
Grafico 7.3.1: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso.....	173
Grafico 7.3.2: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso	174
Grafico 7.3.3: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso	175
Grafico 7.3.4: Legame tra tempo di fermata in stazione e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso	176
Grafico 7.3.5: Legame tra lunghezza delle sezioni di blocco e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso	178
Grafico 7.3.6: Legame tra potenza continuata e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso	180
Grafico 7.3.7: Legame tra velocità d’orario e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso	181
Grafico 7.3.8: Legame tra limiti di velocità e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso	182
Grafico 7.3.9: Legame tra differenza tra le velocità dei due treni e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso.....	183
Grafico 7.3.10: Legame tra distanza tra due posti di precedenza e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso.....	185
Grafico 7.3.11: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea tradizionale – Blocco Fisso.....	186
Grafico 7.3.12: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati (ZOOM) – linea tradizionale – Blocco Fisso	186
Grafico 7.3.13: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea tradizionale – Blocco Fisso	188

Grafico 7.3.14: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati (ZOOM) – linea tradizionale – Blocco Fisso	188
Grafico 7.3.15: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile	195
Grafico 7.3.16: Legame tra tempo di fermata e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile.....	196
Grafico 7.3.17: Legame tra potenza continuata e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile.....	197
Grafico 7.3.18: Legame tra velocità d’orario e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile.....	198
Grafico 7.3.19: Legame tra differenza tra velocità dei due treni e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile.....	200
Grafico 7.3.20: Legame distanza tra due posti di precedenza e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile.....	201
Grafico 7.3.21: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea tradizionale – Blocco Mobile ...	202
Grafico 7.3.22: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati (ZOOM) – linea tradizionale – Blocco Mobile.....	203
Grafico 7.3.23: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea tradizionale – Blocco Mobile	204
Grafico 7.3.24: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati (ZOOM) – linea tradizionale – Blocco Mobile.....	205
Grafico 7.3.25: Confronto al variare dei tempi tecnici - linea tradizionale.....	206
Grafico 7.3.26: Confronto al variare dell'accelerazione di servizio - linea tradizionale.....	206
Grafico 7.3.27: Confronto al variare della lunghezza dei treni- linea tradizionale	207
Grafico 7.3.28: Confronto al variare del tempo di fermata - linea tradizionale	207
Grafico 7.3.29: Confronto al variare della potenza continuata- linea tradizionale	208
Grafico 7.3.30: Confronto al variare dell'incremento della velocità d'orario - linea tradizionale	208
Grafico 7.3.31: Confronto al variare della differenza tra le velocità dei due treni - linea tradizionale	209
Grafico 7.3.32: Confronto al variare della distanza tra i due posti di precedenza - linea tradizionale.....	209
Grafico 7.3.33: Step di potenziamento delle caratteristiche meccaniche del materiale rotabile – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato	214
Grafico 8.1.1: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 10 tr/h	216
Grafico 8.1.2: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 12 tr/h	216
Grafico 8.1.3: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 14 tr/h	217
Grafico 8.1.4: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 16 tr/h	217
Grafico 8.1.5: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 18 tr/h	218
Grafico 8.1.6: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 20 tr/h	219
Grafico 8.1.7: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea suburbana – Blocco Fisso	220
Grafico 8.1.8: Legame tra tempo di recupero della perturbazione e treni/ora – linea suburbana – Blocco Fisso.....	220
Grafico 8.1.9: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 10 tr/h.....	221
Grafico 8.1.10: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 12 tr/h.....	222

Grafico 8.1.11: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 14 tr/h.....	222
Grafico 8.1.12: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 16 tr/h.....	223
Grafico 8.1.13: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 18 tr/h.....	223
Grafico 8.1.14: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 20 tr/h.....	224
Grafico 8.1.15: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 22 tr/h.....	224
Grafico 8.1.16: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 24 tr/h.....	225
Grafico 8.1.17: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 26 tr/h.....	225
Grafico 8.1.18: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea suburbana – Blocco Mobile.....	226
Grafico 8.1.19: Legame tra tempo di recupero della perturbazione e treni/ora – linea suburbana – Blocco Mobile ...	227
Grafico 8.1.20: Confronto del numero dei treni coinvolti nei due sistemi di distanziamento – linea suburbana.....	227
Grafico 8.1.21: Confronto della durata della perturbazione nei due sistemi di distanziamento – linea suburbana.....	228
Grafico 8.2.1: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 8 tr/2h.....	230
Grafico 8.2.2: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 12 tr/2h.....	230
Grafico 8.2.3: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 16 tr/2h.....	231
Grafico 8.2.4: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 20 tr/2h.....	231
Grafico 8.2.5: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 26 tr/2h.....	232
Grafico 8.2.6: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 30 tr/2h.....	232
Grafico 8.2.7: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 34 tr/2h.....	233
Grafico 8.2.8: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 38 tr/2h.....	234
Grafico 8.2.9: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 42 tr/2h.....	234
Grafico 8.2.10: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea AV – Blocco Fisso.....	235
Grafico 8.2.11: Legame tra durata della perturbazione e treni/ora – linea AV – Blocco Fisso.....	235
Grafico 8.2.12: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 8 tr/2h.....	237
Grafico 8.2.13: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 16 tr/2h.....	237
Grafico 8.2.14: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 24 tr/2h.....	238
Grafico 8.2.15: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 32 tr/2h.....	238
Grafico 8.2.16: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 40 tr/2h.....	239
Grafico 8.2.17: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 44 tr/2h.....	239
Grafico 8.2.18: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 48 tr/2h.....	240
Grafico 8.2.19: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 52 tr/2h.....	240
Grafico 8.2.20: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 56 tr/2h.....	241
Grafico 8.2.21: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 60 tr/2h.....	241
Grafico 8.2.22: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 64 tr/2h.....	242
Grafico 8.2.23: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 68 tr/2h.....	242
Grafico 8.2.24: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea AV – Blocco Mobile.....	243
Grafico 8.2.25: Legame tra durata della perturbazione e treni/ora – linea AV – Blocco Mobile.....	243
Grafico 8.2.26: Confronto del numero dei treni coinvolti nei due sistemi di distanziamento – linea AV.....	244

Grafico 8.2.27: Confronto della durata della perturbazione nei due sistemi di distanziamento – linea AV	245
Grafico 8.3.1: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 6 tr/2h	247
Grafico 8.3.2: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 7 tr/2h	248
Grafico 8.3.3: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 8 tr/2h	248
Grafico 8.3.4: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 9 tr/2h	249
Grafico 8.3.5: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 10 tr/2h	249
Grafico 8.3.6: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 11 tr/2h	250
Grafico 8.3.7: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea tradizionale – Blocco Fisso	251
Grafico 8.3.8: Legame tra durata della perturbazione e treni/ora – linea tradizionale – Blocco Fisso	251
Grafico 8.3.9: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 6 tr/2h.....	252
Grafico 8.3.10: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 7 tr/2h.....	253
Grafico 8.3.11: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 8 tr/2h.....	253
Grafico 8.3.12: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 9 tr/2h.....	254
Grafico 8.3.13: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 10 tr/2h.....	254
Grafico 8.3.14: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 11 tr/2h.....	255
Grafico 8.3.15: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea tradizionale – Blocco Mobile	256
Grafico 8.3.16: Legame tra durata della perturbazione e treni/ora – linea tradizionale – Blocco Mobile	256
Grafico 8.3.17: Confronto del numero dei treni coinvolti nei due sistemi di distanziamento – linea tradizionale	257
Grafico 8.3.18: Confronto della durata della perturbazione nei due sistemi di distanziamento – linea tradizionale	257

INDICE DEGLI ALLEGATI

1. ALLEGATI A

1.1. Allegato A.1: Orario originale – linea suburbana – B.F.	I
1.2. Allegato A.2: Orario originale – linea suburbana – B.M.	II
1.3. Allegato A.3: Capacità pratica – linea suburbana – B.F.	III
1.4. Allegato A.4: Capacità pratica – linea suburbana – B.M.	IV
1.5. Allegato A.5: Ritardo primario – Orario originale – linea suburbana – B.F.	V
1.6. Allegato A.6: Ritardo primario – Orario originale – linea suburbana – B.M.	VI
1.7. Allegato A.7: Ritardo primario – Capacità pratica – linea suburbana – B.F.	VII
1.8. Allegato A.8: Ritardo primario – Capacità pratica – linea suburbana – B.M.	VIII

2. ALLEGATI B

2.1. Allegato B.1: Orario originale – linea alta velocità – B.F.	IX
2.2. Allegato B.2: Orario originale – linea alta velocità – B.M.	X
2.3. Allegato B.3: Capacità pratica – linea alta velocità – B.F.	XI
2.4. Allegato B.4: Capacità pratica – linea alta velocità – B.M.	XII
2.5. Allegato B.5: Ritardo primario – Orario originale – linea alta velocità – B.F.	XIII
2.6. Allegato B.6: Ritardo primario – Orario originale – linea alta velocità – B.M.	XIV
2.7. Allegato B.7: Ritardo primario – Capacità pratica – linea alta velocità – B.F.	XV
2.8. Allegato B.8: Ritardo primario – Capacità pratica – linea alta velocità – B.M.	XVI

3. ALLEGATI C

3.1. Allegato C.1: Orario originale – linea tradizionale – B.F.	XVII
3.2. Allegato C.2: Orario originale – linea tradizionale – B.M.	XVIII
3.3. Allegato C.3: Capacità pratica – linea tradizionale – B.F.	XIX
3.4. Allegato C.4: Capacità pratica – linea tradizionale – B.M.	XX
3.5. Allegato C.5: Ritardo primario – Orario originale – linea tradizionale – B.F.	XXI
3.6. Allegato C.6: Ritardo primario – Orario originale – linea tradizionale – B.M.	XXII
3.7. Allegato C.7: Ritardo primario – Capacità pratica – linea tradizionale – B.F.	XXIII
3.8. Allegato C.8: Ritardo primario – Capacità pratica – linea tradizionale – B.M.	XXIV

1 INTRODUZIONE

Recentemente si è assistito, soprattutto nelle aree ad elevata densità abitativa, ad un aumento costante di domanda di traffico ferroviario. In questo contesto, le Imprese di Trasporto Ferroviario si sono viste richiedere un aumento dei servizi offerti, tra cui anche l'incremento del numero di treni, soprattutto nelle ore di punta, per coprire i picchi di domanda. Tale richiesta ricade in ultima istanza sui Gestori delle Infrastrutture, che, sulla base dell'utilizzazione attuale della rete ferroviaria, possono concedere o meno l'introduzione delle nuove tracce orario. Tuttavia, nelle ore di punta, alcune linee sono già sfruttate ai limiti della loro capacità, pertanto, di fronte alla richiesta di aumento del numero di tracce orario e alla necessità di soddisfarla, si possono valutare le tre seguenti alternative:

- ottimizzare l'orario di esercizio, eventualmente supportato da nuovo materiale rotabile;
- installare sistemi più efficienti di sicurezza e segnalamento;
- ristrutturare o ampliare l'infrastruttura.

La valutazione della soluzione al problema deve seguire l'ordine con cui sono elencate le alternative, in quanto il costo della loro realizzazione cresce gradualmente dalla prima alla terza.

La sfida che attualmente è richiesta al Gestore dell'Infrastruttura consiste nello sfruttare al meglio la rete ferroviaria esistente, evitando per quanto possibile gli investimenti economici ed il consumo di suolo pubblico che un ampliamento delle infrastrutture richiederebbe.

Questo lavoro, infatti, si pone l'obiettivo di studiare diverse situazioni, evolute a partire dalle condizioni attuali, che permettano di garantire un aumento di capacità. In particolare, i parametri che verranno considerati sono le caratteristiche meccaniche e funzionali del materiale rotabile e il livello prestazionale di due tipi di distanziamento: Blocco Fisso e Blocco Mobile.

Nel capitolo 2 vengono presentati i due sistemi di distanziamento studiati. Si descrive il Blocco Fisso, in quanto attualmente è il più diffuso sulle reti ferroviarie europee, ed il Blocco Mobile, poiché, seppure tuttora sia scarsamente impiegato, potrebbe diffondersi maggiormente in futuro, anche perché è tuttora oggetto di studi e sperimentazioni. Inoltre si affrontano alcuni aspetti

dell'ERTMS/ETCS¹, in particolare come avviene il segnalamento, la trasmissione dei dati e come è realizzato il distanziamento nell'ambito dei Livelli previsti dal sistema stesso.

Nel capitolo 3 vengono descritti alcuni metodi di calcolo della capacità: quelli empirici di RFI e di Poggio e quello analitico-grafico proposto dall'UIC, su cui si basa la procedura utilizzata nel presente lavoro. Inoltre si approfondisce il concetto di capacità, in modo da considerarne anche i fattori qualitativi del servizio ferroviario offerto.

Nel capitolo 4 vengono descritti i metodi di studio della propagazione dei ritardi proposti da Accattatis e dall'UIC. In seguito verrà presentato un metodo che deriva da quest'ultimo e su cui si basa la procedura di calcolo utilizzata per i ritardi nel presente lavoro.

Il capitolo 5 invece presenta prima una panoramica sulla trazione elettrica, in seguito le caratteristiche meccaniche dei convogli utilizzati nello studio che viene compiuto nei successivi capitoli. Sono stati considerati treni reali, in modo da poterne replicare fedelmente il comportamento nelle simulazioni che verranno effettuate in seguito.

Per applicare le procedure di calcolo della capacità e della propagazione dei ritardi nei casi studiati è stato necessario avvalersi di software di analisi simulata della circolazione. In particolare, tali programmi sono stati realizzati ad hoc dagli autori, in modo che essi rispondano alle specifiche esigenze dello studio compiuto. Gli algoritmi alla base dei codici di calcolo scritti vengono riportati all'interno del capitolo 6.

Nei capitoli 7 ed 8 sono state definite tre linee ideali, in rappresentanza di queste tre tipologie: linea suburbana, linea ad alta velocità e linea tradizionale. Per ciascuna di esse è stato pensato un orario "tipico" e si è quindi proceduto allo studio della capacità e della propagazione dei ritardi. Tale studio è stato eseguito con i due diversi sistemi di distanziamento (Blocco Fisso e Blocco Mobile), sia in due situazioni base, sia facendo variare una serie di parametri. Infine, dopo aver messo a confronto i risultati ottenuti con i due sistemi, nel capitolo 7 (in cui si studia la capacità) sono stati proposti anche dei casi gestiti con Blocco Fisso, in cui, sotto particolari condizioni, è

¹ L'ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System/European Train Control System) è un avanzato sistema di gestione, controllo e protezione del traffico ferroviario e relativo segnalamento a bordo, progettato allo scopo di sostituire i molteplici e, tra loro incompatibili, sistemi di circolazione e sicurezza delle varie Ferrovie Europee e di garantire l'interoperabilità dei treni.

possibile raggiungere i risultati ottenuti con il Blocco Mobile, che, nei casi studiati, consente una capacità superiore.

Lo scopo della tesi è quello di presentare una metodologia di analisi di capacità e ritardi che sia applicabile a diversi contesti al fine di determinare vantaggi e svantaggi di un sistema di distanziamento sull'altro e possibili strategie per ottenere risultati migliori. Ai fini di questo lavoro, non sono state effettuate analisi economiche, le quali dovranno essere invece eseguite se si utilizzano le procedure presentate come strumento decisionale da parte del Gestore dell'Infrastruttura.

Infine sono state tratte delle conclusioni di validità generale, che sono state espresse nel capitolo finale, in cui si propongono anche possibili sviluppi ed approfondimenti sul confronto tra i due sistemi di distanziamento.

2 TECNICHE DI DISTANZIAMENTO

Il distanziamento consiste nel mantenimento di una certa distanza, superiore allo spazio di arresto, tra un treno e quelli che lo precedono e lo seguono.

Nell'esecuzione del distanziamento si presentano due obiettivi in contrasto tra loro: la sicurezza e la capacità della linea. Per conseguire la sicurezza si attuano diversi regimi di circolazione che, al crescere del livello tecnologico, possono essere così elencati:

- regime di marcia a vista;
- regimi elementari:
 - spola;
 - pilotaggio;
- regimi di distanziamento a tempo;
- regimi di distanziamento a spazio fisso:
 - giunto (regime aperto);
 - consenso (regime chiuso);
 - a blocco elettrico:
 - Blocco Fisso manuale;
 - Blocco Fisso automatico;
- regimi di distanziamento a spazio variabile:
 - Blocco Mobile.

Il più semplice e antico sistema di distanziamento è il regime di marcia a vista, ma esso non è compatibile con condizioni di scarsa visibilità e comunque con velocità superiori a poche decine di chilometri orari. Le soluzioni adottate successivamente hanno risolto il problema della sicurezza a scapito della capacità, potendo prevedere un solo treno lungo un tratto di linea tra due stazioni, come nei regimi elementari e quelli di distanziamento a tempo. Anche nei distanziamenti a spazio, come il regime di giunto e consenso, è possibile far circolare un solo treno in un tratto di linea tra due stazioni; tuttavia l'evoluzione di questo tipo di distanziamento ha portato a soluzioni che sono ancora oggi utilizzate, come quelle a Blocco Fisso.

2.1 Blocco Fisso

Il principio base del distanziamento a Blocco Fisso è quello di garantire che una sezione di blocco possa essere occupata da un solo treno. Quindi, se una linea fosse costituita da n sezioni di blocco, su di essa potrebbero essere presenti al massimo n treni. Questo in realtà non è possibile, in quanto la condizione necessaria affinché un treno possa procedere è che la sezione immediatamente a valle sia libera. Per realizzare il sistema di distanziamento a Blocco Fisso si possono utilizzare diverse tecnologie; la più diffusa fa uso del blocco elettrico automatico e di segnali luminosi. Il primo rileva l'occupazione delle sezioni e l'integrità dei treni mentre il secondo fornisce indicazioni al personale di bordo riguardo alle manovre da compiere. Il segnalamento luminoso è composto da due segnali a due aspetti: quello di 1° categoria (rosso o verde) protegge la sezione successiva ed è posto all'ingresso di essa, quello di avviso (giallo o verde) precede quello di 1° categoria, anticipandone l'aspetto.

Ad oggi, nella quasi totalità delle linee ferroviarie più importanti, viene utilizzato il segnalamento luminoso a tre aspetti: il segnale ha contemporaneamente funzione di protezione della sezione immediatamente a valle o di avviso del segnale successivo. Questo tipo di segnalamento da solo, senza l'ausilio di ulteriori dispositivi di segnalamento, permette di realizzare sezioni di blocco aventi lunghezza tendente alla distanza di arresto, al fine di aumentare la capacità della linea.

Come è possibile vedere dalla Figura 2.1.1 il segnale assume colore rosso quando la sezione successiva è occupata, giallo per avvisare che il successivo segnale è rosso, verde quando il treno ha almeno due sezioni libere davanti a sé.

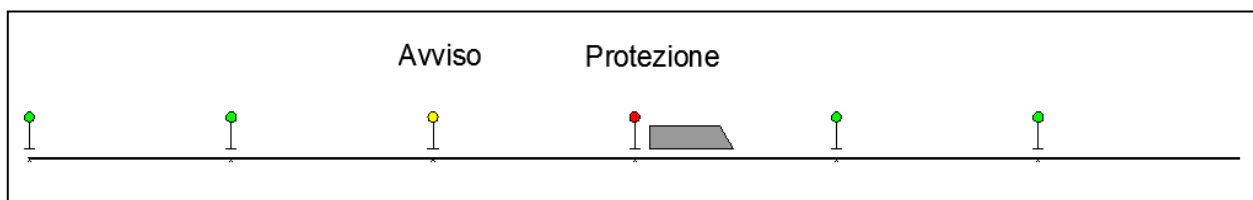


Figura 2.1.1: Segnalamento a tre aspetti

Detto ciò, se ci fosse un treno per ogni sezione di blocco, ciascuno avrebbe di fronte a sé un segnale rosso e non potrebbe procedere. Per garantire una circolazione regolare è necessario che, quando un treno approcia un segnale, esso possa essere superato senza restrizioni (ovvero sia

verde). Questo significa che teoricamente i treni potrebbero susseguirsi con un distanziamento pari a due sezioni di blocco più la lunghezza del treno; in questo modo il treno seguente quando approccia il segnale lo troverebbe verde nell'istante in cui si trova in corrispondenza di esso e potrebbe continuare indisturbato la sua marcia, avendo esattamente due sezioni libere davanti a sé.

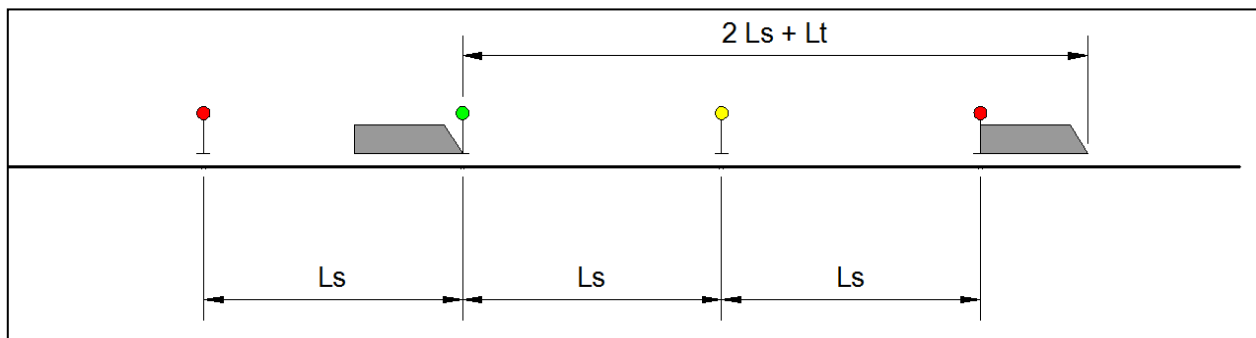


Figura 2.1.2: Distanziamento minimo teorico nel Blocco Fisso con segnalamento a tre aspetti

Tuttavia il distanziamento deve essere aumentato rispetto a quanto detto perchè:

- la tecnologia che percepisce l'occupazione della sezione ed attua il cambiamento dell'aspetto dei segnali impiega un certo tempo di azione;
- il segnale di avviso diventerebbe verde per un solo istante di tempo e quindi non darebbe il tempo necessario al macchinista di percepire il segnale e comportarsi di conseguenza.

Per tenere conto del primo punto occorre prendere in considerazione i tempi tecnici: essi sono l'intervallo temporale necessario alle apparecchiature di rilevare l'occupazione delle sezioni e cambiare l'aspetto del segnale.

Inoltre occorre considerare anche la seconda questione: il macchinista deve avere il tempo materiale di percepire il segnale e comportarsi di conseguenza.

Questa situazione può essere affrontata in due diversi modi.

Sulle linee dove non c'è la ripetizione dei segnali in macchina, è sufficiente prevedere un certo *tempo di avvistamento* del segnale (t_a). Esso costituisce l'anticipo con cui la sezione di blocco 3 deve essere liberata prima che il treno 2 arrivi con la testa in corrispondenza del segnale 2. Nella Figura 2.1.3 si mostra quale deve essere il distanziamento affinché il segnale 2 diventi verde con

un anticipo pari al tempo di avvistamento rispetto all'istante in cui il treno 2 superi tale segnale, consentendo un regolare deflusso del traffico ferroviario.

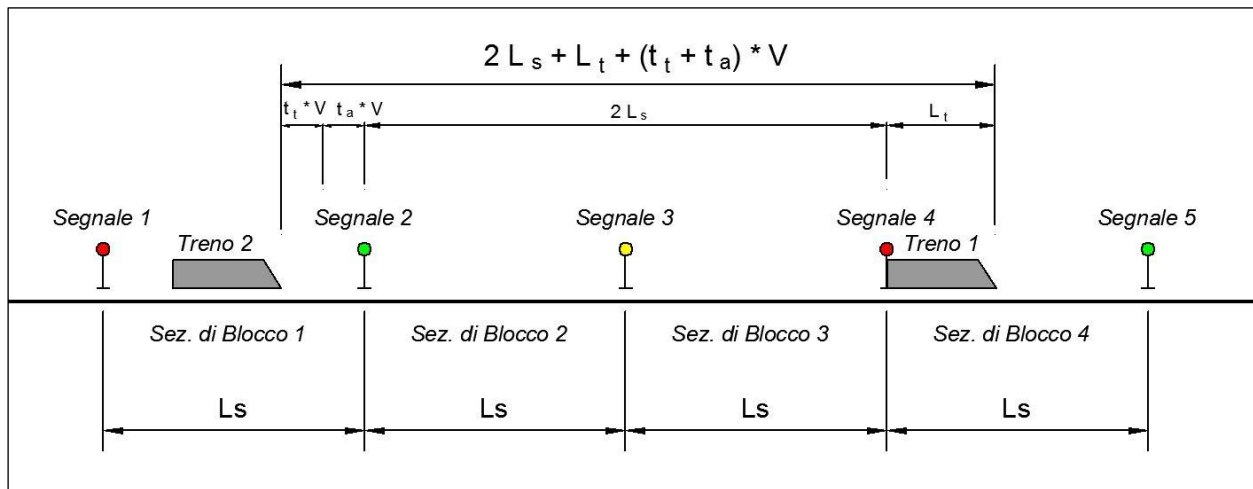


Figura 2.1.3: Distanziamento minimo pratico nel Blocco Fisso con segnalamento a tre aspetti

Applicando il distanziamento presentato, il treno 2 ha la possibilità di procedere indisturbato. Rispetto al segnale 2, il treno 1 ha percorso 2 sezioni di blocco e uno spazio pari alla propria lunghezza; il segnale 2 diventerà verde solo dopo che il treno 2 avrà proceduto, rispetto al punto in cui è raffigurato, per un tempo pari ai tempi tecnici. Il treno 2, a quel punto, avrà a disposizione un tempo pari al tempo di avvistamento affinché il macchinista recepisca il segnale prima che esso venga superato dal treno.

In Italia la lunghezza delle sezioni di blocco vale normalmente 1'350 m, che corrisponde alla distanza di arresto di un treno viaggiante ad una velocità di 140 km/h che frena con una decelerazione costante pari a 0.56 m/s^2 (formula $\frac{v^2}{2 \cdot d}$). Tale velocità è assunta come massima sulle linee senza ripetizione dei segnali a bordo (blocco automatico a correnti fisse).

Nel caso in cui sia necessario consentire elevate velocità di tracciato è indispensabile attrezzare le linee e le locomotive con dispositivi atti alla ripetizione dei segnali a bordo (blocco automatico a correnti codificate). In questo modo il segnale di protezione della sezione a valle viene percepito con almeno una sezione di anticipo (per velocità elevate occorre infatti aumentare il distanziamento). Sulla rete italiana le massime velocità ammesse sono di 180 km/h con la ripetizione a 4 codici e di 250 km/h con la ripetizione a 9 codici.

2.1.1 Blocco Automatico a Correnti Codificate - BACC

Tra il blocco automatico a correnti fisse e quello a correnti codificate, sicuramente il secondo è il sistema più efficiente e sicuro e quindi il più utilizzato sulle moderne linee ferroviarie europee.

Questo sistema sfrutta le correnti di binario per trasmettere le informazioni relative all'aspetto dei segnali a bordo, attraverso appositi captatori posizionati sul carrello anteriore della locomotiva. Le rotaie sono infatti attraversate da una corrente alternata la quale genera un campo magnetico variabile che viene captato dalla locomotiva e trasmesso al ripetitore dei segnali a bordo. L'informazione relativa all'aspetto del segnale è materializzata attraverso il numero di interruzioni della corrente alternata in un minuto.

La sicurezza nei confronti del comportamento del personale di macchina è garantita da un apparato di controllo a bordo della locomotiva che può provocare l'intervento della frenatura di emergenza se il macchinista non reagisce, entro un determinato tempo, alla comparsa di un segnale più restrittivo del precedente.

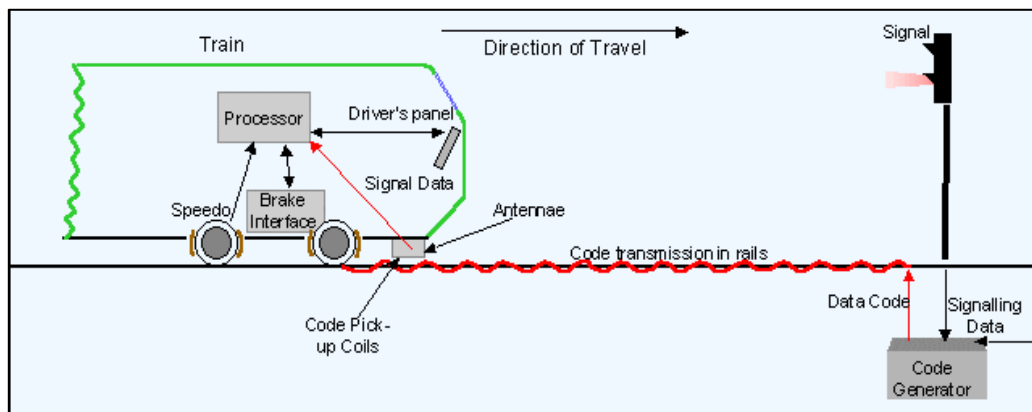


Figura 2.1.4: Funzionamento di della ripetizione dei segnali in macchina

Il BACC permette di realizzare le *sezioni di blocco concatenate*: il codice captato all'interno di una sezione di blocco dipende dal numero di sezioni di blocco libere davanti ad essa. Ad ogni codice corrisponde una velocità massima, stabilita proprio in funzione dello spazio libero rilevato di fronte al treno. All'interno di ciascuna sezione, il treno non potrà superare la velocità massima corrispondente al codice e quindi, se la velocità di ingresso è superiore, il macchinista deve regolare la marcia per rispettare il vincolo dato dal codice [1]. In sostanza, l'informazione fornita dal codice captato anticipa quella fornita dal segnale in uscita dalla sezione. Per questo motivo non

deve essere previsto alcun tempo di avvistamento del segnale, in quanto la prescrizione è disponibile in continuo per tutta la lunghezza della sezione precedente il segnale stesso. Occorre tuttavia considerare che la reazione del macchinista, sebbene possa avvenire teoricamente con una sezione di anticipo rispetto al punto in cui è presente il segnale, in realtà non sarà istantanea, ma ci vorrà un certo tempo, chiamato *tempo di riconoscimento* (sulle ferrovie italiane è assunto pari a 3 secondi) affinché il macchinista prenda atto dell'informazione relativa al codice e regoli la marcia di conseguenza.

2.1.1.1 Sistema discontinuo di ricezione delle informazioni

Molte linee ferroviarie, tra cui quelle attrezzate con il BACC, sono dotate inoltre di un sistema di sicurezza che attua la protezione della marcia dei treni rispetto a:

- le condizioni imposte dai segnali;
- la velocità consentita dalla linea in condizioni normali e di degrado;
- la velocità massima ammessa dal materiale rotabile.

Tale sistema è trasparente al macchinista, che continua ad operare con le abituali modalità di condotta, ma è in grado di attivare la frenatura di emergenza nel caso in cui vengano violate le condizioni di sicurezza. Tale sistema è costituito da un sottosistema di terra SST (encoder e boe) e da un sottosistema di bordo SSB (computer). Il SSB è in grado di generare le curve di frenatura avvalendosi, oltre che delle informazioni relative al treno stesso, di un sistema odometrico.

In Italia tale sistema prende il nome di SCMT (Sistema Controllo Marcia Treni) mentre a livello Europeo tale sistema è alla base del funzionamento dello standard di interoperabilità ERTMS Livello 1.

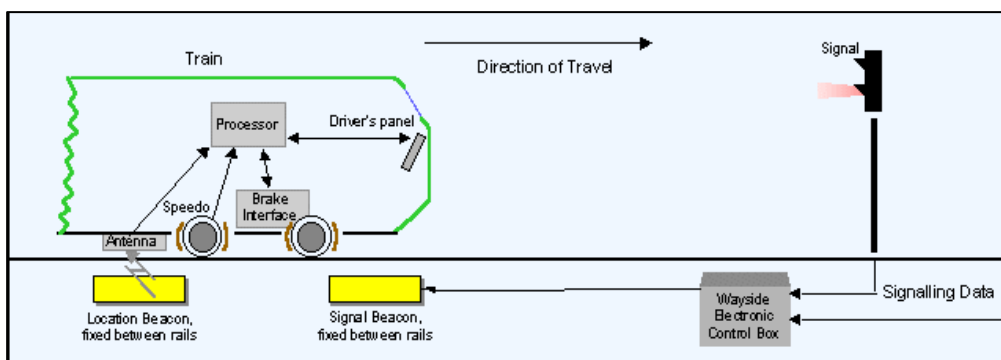


Figura 2.1.5: Trasmissione discontinua delle informazioni tramite Balise

2.1.2 ERTMS Livello 2

Alcune tra le più moderne linee ferroviarie europee sono dotate dello standard di interoperabilità ERTMS Livello 2. Questo sistema viene utilizzato su linee dotate di sezioni di Blocco Fisso con ripetizione dei segnali a bordo. La presenza dei segnali luminosi lungo la linea è superflua così come non sono più utilizzati i circuiti di binario codificati; il regime di circolazione viene esercitato con il Blocco Radio [2]. In questo caso l'occupazione del binario viene rilevata attraverso circuiti di binario ad audiofrequenza ed il controllo dell'integrità del treno viene effettuato con la metodologia tradizionale attraverso i circuiti di binario.

2.1.2.1 Sistema continuo di ricezione delle informazioni

Il sistema ERTMS di Livello 2 permette la gestione del distanziamento dei treni telecomandata da un Posto Centrale, attraverso la trasmissione radio di dati digitali in continuo grazie alla tecnologia GSM-R. Anche in questo caso il sistema è composto da un sottosistema di terra SST (Boe), utilizzato principalmente per localizzare in modo esatto la posizione del treno, e un sottosistema di bordo (computer).

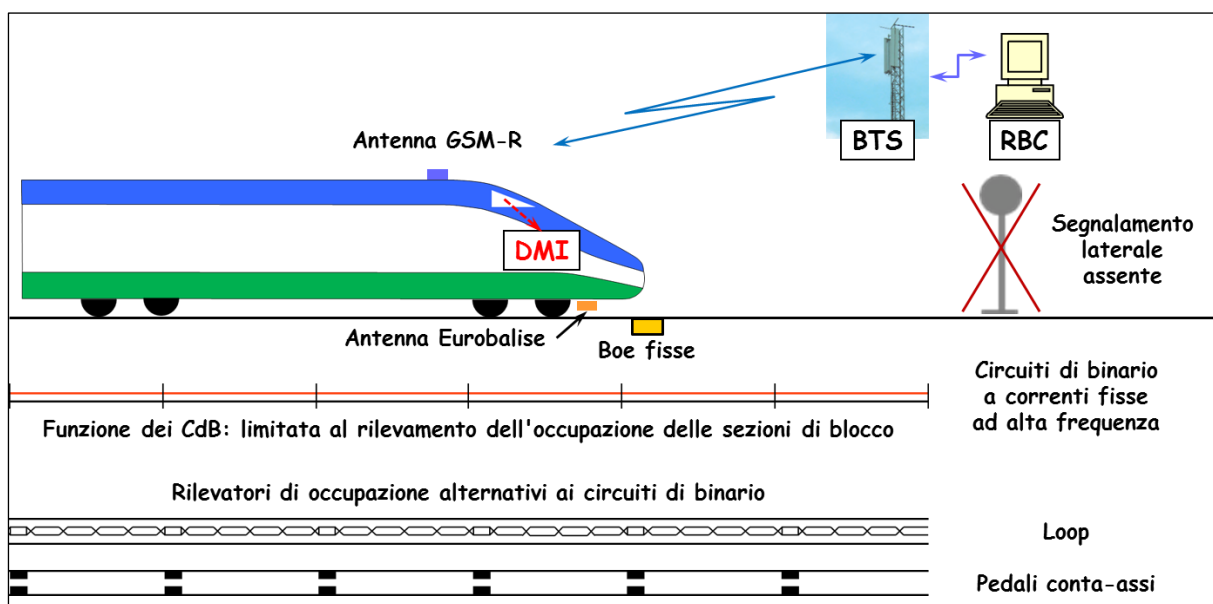


Figura 2.1.6: Trasmissione continua delle informazioni tramite GSM-R e Blocco Radio

Dal treno vengono trasmesse al Radio Block Center (RBC) le seguenti informazioni:

- Posizione esatta del treno;
- Velocità attuale;

- Direzione di marcia.

Il treno riceve poi dal RBC le seguenti informazioni:

- Velocità massima e Velocità obiettivo;
- Vincoli relativi al percorso;
- Possibili rallentamenti temporanei.

Rispetto al sistema discontinuo di ricezione delle informazioni, lo standard ERTMS L2 permette, grazie all'utilizzo di una tecnologia più avanzata ma anche più costosa, un livello di sicurezza e di sfruttamento della linea maggiori.

2.2 Blocco Mobile

Negli ultimi anni, lo sviluppo tecnologico, l'aumento del traffico ferroviario e la sempre più difficile possibilità di costruire nuove infrastrutture, hanno portato alla possibilità di svincolarsi dalle sezioni di Blocco Fisso a favore di un più flessibile distanziamento a Blocco Mobile.

Infatti la potenzialità di una linea è inversamente proporzionale alla lunghezza delle sezioni di blocco. Nel caso di Blocco Fisso, le sezioni hanno una lunghezza costante e circa pari alla distanza di arresto del treno più veloce che può circolare su tali linee. È evidente però che, specialmente su una linea eterotachica, ci saranno treni che circoleranno a velocità minori o comunque con caratteristiche di accelerazione e decelerazione diverse. Inoltre una linea con tali sezioni di blocco fisse non permetterebbe la circolazione di un treno con velocità maggiore di quella rispetto alla quale sono state calcolate le lunghezze delle sezioni. Entrambi questi aspetti portano ad un abbattimento della qualità del servizio nonostante la sicurezza sia sempre garantita.

Pertanto si è pensato di attuare un distanziamento variabile in funzione della velocità e della posizione effettiva di ciascun treno. A questa esigenza risponde l'utilizzo di sezioni di blocco concatenate o, in maggior misura, l'adozione del distanziamento a Blocco Mobile. Con quest'ultimo in particolare si può fare in modo che tra la coda di un treno e la testa del successivo il distanziamento sia pari alla sola distanza di arresto incrementata di un certo franco di sicurezza e dello spazio percorso durante i tempi tecnici.

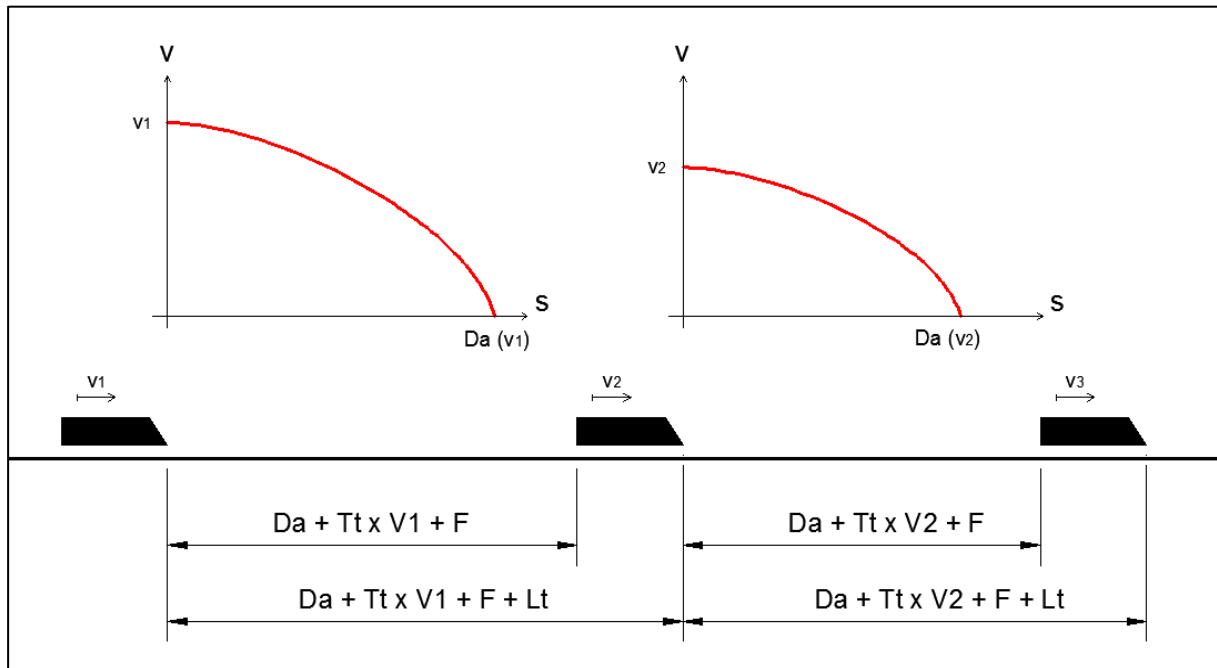


Figura 2.2.1: Distanziamento minimo pratico nel Blocco Mobile

2.2.1 Tempi tecnici

Nel distanziamento a Blocco Mobile, si intendono per tempi tecnici il tempo necessario alla rilevazione di posizione e velocità del treno antecedente, di trasmissione dell'informazione direttamente o indirettamente al treno seguente, elaborazione delle informazioni e il tempo impiegato per regolare di conseguenza la marcia (comprendente sia il tempo per l'azionamento dei comandi di guida, sia il tempo per l'intervento degli organi meccanici governati dai comandi).

2.2.2 Franco di sicurezza

Il franco di sicurezza è la minima distanza sempre garantita tra due treni in linea. In particolare tra due convogli la distanza sarà esattamente il franco di sicurezza quando il secondo si ferma a causa dell'arresto del treno che lo precede. Accade infatti che, dopo l'arresto del primo treno per un tempo indefinito, il secondo, una volta trascorso il tempo tecnico, inizia la frenatura quando si trova ad una distanza pari alla distanza di arresto più il franco di sicurezza. Il suo scopo è proprio quello di evitare che un ritardo nell'effettuazione delle operazioni precedenti porti alla collisione. Pertanto tale franco deve essere commisurato alla velocità del convoglio, o più semplicemente, della linea. Per un treno suburbano che viaggia a basse velocità, un ritardo nel rilevamento della posizione del treno antecedente o nella manovra di frenatura, farà tardare l'arresto di qualche

decina di metri, viceversa per un treno ad alta velocità, pochi secondi di ritardo portano ad una traslazione di centinaia di metri del punto di arresto finale.

2.2.3 ERTMS Livello 3

Come per l'ERTMS Livello 2 si ha una telecomunicazione via GSM-R continua terra-treno ma la differenza sostanziale tra questi due sistemi sta nel fatto che per il Blocco Mobile non esistono più le sezioni di blocco e quindi scompaiono anche le correnti di binario ed i segnali luminosi a terra. In questo modo il controllo dell'integrità del treno deve essere effettuato a bordo.

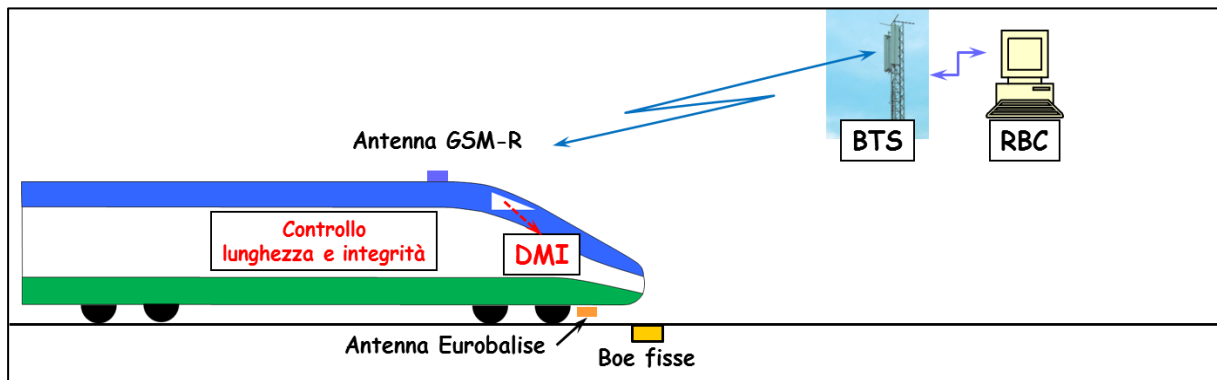


Figura 2.2.2: Trasmissione continua delle informazioni tramite GSM-R e Blocco Mobile

Il Radio Block Center è in grado di acquisire con continuità da ogni treno le seguenti informazioni:

- Posizione istantanea del treno;
- Velocità istantanea del treno;
- Lunghezza del treno;
- Integrità della composizione.

Elaborando opportunamente tali dati è possibile fornire al personale di condotta il valore di velocità da mantenere per garantire le condizioni di sicurezza. Queste informazioni vengono sintetizzate nelle Autorizzazioni al Movimento (MA) [3].

3 METODI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ DELLE LINEE FERROVIARIE

3.1 Premessa

La definizione della capacità in ambito ferroviario è un obiettivo di primaria importanza per i gestori della rete. Un efficiente sfruttamento delle potenzialità della linea permette di gestire elevati traffici di passeggeri e/o merci, mediante un soddisfacente livello di servizio.

Per i gestori delle infrastrutture ferroviarie è fondamentale poter pianificare gli interventi necessari per un aumento dell'offerta di mobilità, per fare ciò occorre conoscere la capacità della rete e la percentuale di essa che viene effettivamente utilizzata, in modo da stabilire quanti treni in più possono essere previsti (ed il relativo livello di puntualità atteso) e qual è il loro numero massimo oltre il quale è necessario un potenziamento delle infrastrutture.

Tuttavia, la definizione di capacità in ambito ferroviario non è univoca. Sono state date da vari autori diverse definizioni e sono stati proposti vari metodi per stimarla. Una panoramica su alcune delle più ricorrenti definizioni che si trovano in letteratura è la seguente:

- *"La capacità ferroviaria è la possibilità da parte del gestore di fornire, come richiesto, i servizi necessari con accettabili costi e livelli di servizio in modo da soddisfare la domanda di mobilità attuale e futura" [4];*
- *"La capacità di una linea ferroviaria è la possibilità di operare i treni garantendo una certa puntualità" [5];*
- *"La capacità è il massimo numero di treni che possono transitare in un dato punto della linea analizzata in un dato intervallo di tempo" [6];*
- *"La capacità è il numero di treni che può essere inserito in un orario di esercizio, il quale non presenti conflitti, sia attrattivo commercialmente, rispettoso di norme e requisiti di sicurezza, esercibile a fronte di prestabiliti livelli di ritardi primari e nel contempo soddisfacente riguardo i livelli di performance concordati" [7];*

Queste definizioni differiscono le une dalle altre. Alcune, come quella data da Longo e Stok [6], sono più deterministiche rispetto ad altre. In particolare quella di Barter [7] è prettamente qualitativa e quindi non può essere tradotta in un procedimento analitico che esprima la capacità. Viceversa, la definizione di Longo porterebbe ad assumere come capacità il numero di treni/ora, senza specificare una serie di fondamentali fattori come il tipo di treni circolanti ed il livello di puntualità corrispondente a tale numero di treni.

Altri autori e la stessa Union International des Chemins de fer (UIC) preferiscono non esprimere una definizione assoluta in materia. *"La capacità di per sé stessa non esiste. La capacità dipende dal modo in cui l'infrastruttura ferroviaria è utilizzata"* [8], essa può essere misurata considerando non uno ma una serie di parametri, come verrà in seguito illustrato nel paragrafo 3.4.2. Nel presente elaborato si concorda con questa affermazione, in quanto non è corretto parlare di capacità di una linea in modo assoluto, senza fare riferimento ad un particolare sistema di segnalamento, tipo di traffico circolante e livello di puntualità desiderato.

Di seguito si riportano alcune metodologie proposte in letteratura per il calcolo della capacità delle linee ferroviarie.

3.2 RFI

Il gestore italiano Rete Ferroviaria Italiana ha emanato una specifica norma interna per fornire criteri oggettivi ed univoci per la determinazione della capacità delle linee [9]. In questo documento si sottolinea come la capacità ha un valore che dipende non soltanto dalle caratteristiche dell'infrastruttura ma anche dalle caratteristiche del traffico e dai livelli di qualità desiderati.

Per prima cosa viene definita la capacità teorica come dipendente soltanto dalle caratteristiche dell'infrastruttura e dai livelli di puntualità richiesti. La formula deterministica è la seguente:

$$C_{teorica\ oraria} = N \cdot \frac{60}{D_n}$$

dove:

- N è il numero di binari;

- D_n è il distanziamento in minuti dedotto dal tempo di sblocco alla velocità di rango A¹.

Si ottiene così un valore basato sull'ideale condizione di rigida omotachia. Nel tempo di sblocco possono essere inclusi degli eventuali margini di tempo² a seconda del livello di puntualità desiderato. Non essendo solitamente vera l'ipotesi di treni circolanti tutti alla medesima velocità, la norma impone il successivo calcolo della capacità commerciale, che tiene conto dell'eterogeneità della domanda in termini di velocità:

$$C_{comm. oraria} = \frac{C_{teorica oraria}}{K_1}$$

dove K_1 è una costante che è stata tarata sulla base di prove sperimentali, quindi la formula è empirica.

$$K_1 = \begin{cases} 1.0 & \text{per un unico livello di velocità commerciale} \\ 1.3 & \text{per due – tre livelli di velocità commerciale} \\ 1.5 & \text{per quattro – cinque livelli di velocità commerciale} \end{cases}$$

Inoltre la scelta del valore di K_1 dipende da dati qualitativi sul traffico (il numero di diversi livelli significativi di velocità).

3.2.1 Osservazioni

Un limite evidente di questa definizione di capacità è appunto la dipendenza da dati qualitativi. Se si considera una stessa linea soggetta in due casi ad uno stesso numero di livelli di velocità commerciali, si otterrebbe che la capacità è la medesima anche se tali velocità fossero di entità diversa tra un caso e l'altro. La formulazione di RFI ha però il pregio di essere di veloce applicazione e può dare un risultato valido in prima approssimazione, da verificare in seguito con l'utilizzo di una procedura più accurata.

¹ Per Rango di Velocità si intende la velocità a cui può viaggiare un treno su un tratto di linea a seconda delle caratteristiche del materiale rotabile (Rango A, B, C, P). Il limite di velocità aumenta passando da A a P. Il Rango A è il limite più basso, associato ai treni merci. Il Rango P è associato ai treni ad assetto variabile e non è presente su tutte le linee.

² I margini di tempo sono definiti come il massimo ritardo che un treno può avere rispetto alla sua traccia oraria con la condizione che non causi ostacoli al treno seguente puntuale. Per il dimensionamento dei margini, tema che non verrà trattato in questo lavoro, ci si basa su metodi probabilistici, che tengono conto della tendenza dei convogli a presentare ritardi.

3.3 Poggio

L'autore ha affrontato nelle sue pubblicazioni [10] il calcolo della capacità in condizioni ideali: orario cadenzato dei treni e traffico omotachico. Poggio definisce la capacità di una linea come il rapporto tra la velocità dei treni e il distanziamento spaziale tra di essi:

$$p = \frac{v}{D}$$

dove:

- v è la velocità dei treni in m/s;
- D è il loro distanziamento minimo spaziale in m.

La formula esprime il numero di treni transitanti nell'unità di tempo, pertanto la capacità oraria può essere così calcolata:

$$C_{oraria} = p \cdot 3'600$$

La formula è analoga all'espressione della capacità teorica proposta da RFI, infatti il rapporto tra velocità e distanziamento spaziale (che in Poggio compare all'inverso) altro non è che il distanziamento temporale (che infatti compare a denominatore nella formula di RFI).

L'autore ha effettuato anche uno studio volto ad analizzare se i sistemi di distanziamento a Blocco Mobile siano effettivamente vantaggiosi rispetto ai sistemi a Blocco Fisso. In particolare il confronto è centrato sul paragone tra blocco automatico a 9 codici (presente in Italia sulla tratta di RFI Roma-Firenze) ed il blocco "ultra-corto" realizzato sulle linee tedesche di Deutsche Bahn con il sistema LZB [11]. Ai fini del calcolo della capacità, il blocco ultra-corto è molto simile al Blocco Mobile, infatti la rilevazione di posizione e velocità del treno e la trasmissione dei dati terra-bordo avviene discretamente ma comunque in modo molto frequente: ogni 25 m (caso assimilabile alla trasmissione continua). Le differenze rispetto al Blocco Mobile risiedono nella tecnologia utilizzata, non tanto nel risultato pratico del distanziamento tra treni.

Poggio propone di utilizzare il seguente distanziamento spaziale nel caso di Blocco Fisso:

$$D = \begin{cases} 2 \cdot L_s & 0 \leq V \leq 115 \frac{km}{h} \\ 3 \cdot L_s & 115 < V \leq 200 \frac{km}{h} \\ 4 \cdot L_s & 200 < V \leq 230 \frac{km}{h} \\ 5 \cdot L_s & 230 < V \leq 250 \frac{km}{h} \end{cases}$$

dove L_s è la lunghezza delle sezioni di blocco.

Per il Blocco Mobile il distanziamento proposto è il seguente:

$$D = k \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot d} + v \cdot t_r \right) + L_t + H$$

dove:

- $k = 1.5$ è un coefficiente di sicurezza;
- d è la decelerazione dei treni;
- $t_r = 0$ è il tempo di reazione;
- $L_t = 200$ m è la lunghezza dei treni;
- $H = 200$ m è un ulteriore franco di distanziamento spaziale.

3.3.1 Confronto tra Blocco Fisso e Blocco Mobile con il modello di Poggio

Si è deciso di ripercorrere il confronto eseguito da Poggio, applicando qualche modifica al metodo per adattarlo ai casi studiati. Sono state confrontate tre diverse linee: una linea suburbana, una linea tradizionale ed una ad alta velocità. Di esse si è calcolata la capacità nel caso di distanziamento a Blocco Fisso (diversa lunghezza delle sezioni di blocco a seconda della velocità tipica della linea) e Mobile.

Linea	Lunghezza della sezione di blocco (L_s [m])
Suburbana	450
Tradizionale	1'350
Alta Velocità	1'800

Tabella 3.3.1: Lunghezza della sezione di blocco nel metodo di Poggio

Si sono considerati treni da 200 m di lunghezza e i seguenti distanziamenti spaziali:

$$D_{tradizionale} = \begin{cases} 2 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t & 0 \leq V \leq 110 \frac{km}{h} \\ 3 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t & 110 < V \leq 180 \frac{km}{h} \\ 4 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t & 180 < V \leq 250 \frac{km}{h} \end{cases}$$

$$D_{suburbana} = 2 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t$$

$$D_{alta\ velocità} = \begin{cases} 2 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t & 0 \leq V \leq 110 \frac{km}{h} \\ 3 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t & 110 < V \leq 180 \frac{km}{h} \\ 4 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t & 180 < V \leq 250 \frac{km}{h} \\ 5 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t & 250 < V \leq 300 \frac{km}{h} \\ 6 \cdot L_s + t_t \cdot v + L_t & 300 < V \leq 340 \frac{km}{h} \end{cases}$$

dove:

- $t_t = 10\text{ s}$ è il tempo tecnico.

Si è deciso di ipotizzare cautelativamente che la liberazione/occupazione della sezione di blocco e la reazione del macchinista avvengano con un ritardo complessivo chiamato tempo tecnico e pari a 10 s. Anche nel Blocco Fisso è stato assunto al posto di t_r un tempo tecnico pari a 10 s.

Nel grafico seguente viene riportata la potenzialità di circolazione delle linee in funzione della velocità dei treni.

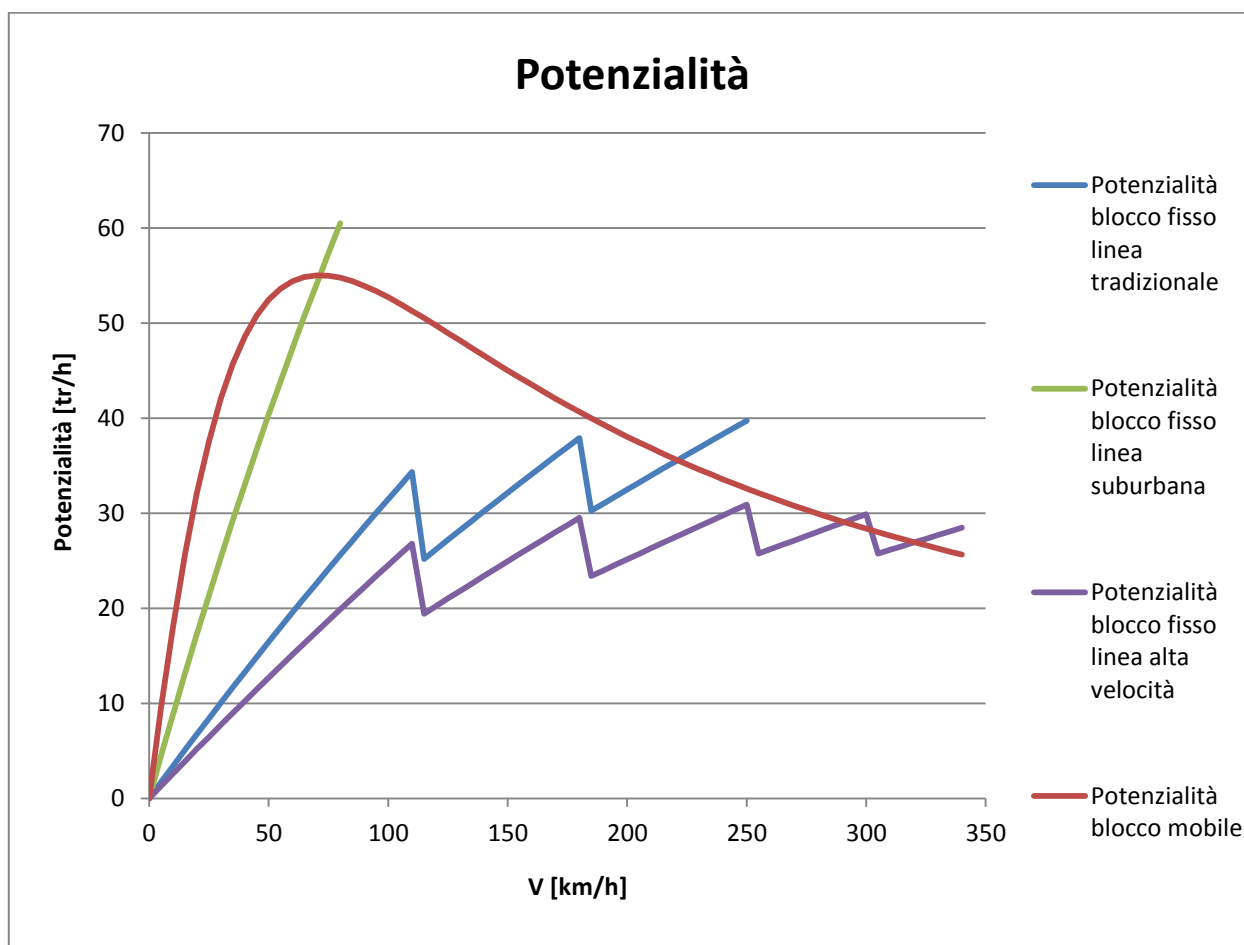


Grafico 3.3.1: Legame tra potenzialità della linea e velocità secondo Poggio

Osservando le potenzialità sulla linea tradizionale, si nota che l'incremento di capacità reso possibile dal Blocco Mobile è molto consistente fino a velocità di esercizio inferiori ai 180 km/h, oltre le quali detto incremento si riduce, fino ad annullarsi su linee tradizionali per velocità prossime o superiori a 230 km/h. L'apparente superiorità del distanziamento a sezioni fisse nel campo di velocità più alte deriva dal valore di k , che nel lavoro di Poggio è fissato ad 1.5 sulla base di considerazioni relative alla sicurezza ed al massimo traffico, in mancanza di più precisi riferimenti.

Il vantaggio del Blocco Mobile sulle basse velocità risulta inferiore se le lunghezze delle sezioni di Blocco Fisso sono ottimizzate per questi range di velocità. Quello che si nota è infatti che sulla linea suburbana con sezioni da 450 m il divario di potenzialità tra i due sistemi è inferiore, ed anzi, per gli stessi motivi evidenziati precedentemente, per velocità superiori a 70 km/h si ha un'apparente superiorità del Blocco Fisso.

Il Blocco Mobile risulta vantaggioso anche sulle linee ad alta velocità ma per velocità superiori a 230 km/h i due sistemi risultano pressoché equivalenti, confermando la tesi generale secondo cui il Blocco Mobile è più prestante se le velocità non sono elevate.

3.3.2 Osservazioni

Uno studio di questo tipo fornisce una prima risposta al confronto che ci si è proposti di realizzare nel presente lavoro. In sostanza il Blocco Mobile sembra in generale più vantaggioso, ma la sua superiorità diminuisce qualora si dimensionino sezioni di Blocco Fisso con lunghezza ottimizzata rispetto alle velocità di servizio della linea. Questo discorso è generalmente corretto, tuttavia il metodo presenta alcuni difetti che non permettono di estenderne le conclusioni ai casi reali.

- *Circolazione omotachica*

L'ipotesi di partenza di Poggio è quella che tutti i treni sulla linea circolino alla stessa velocità. Per essere vera questa ipotesi occorrerebbe che il materiale rotabile sia omogeneo e l'orario di servizio sia omologo per ogni treno (stesse fermate lungo la linea). In generale questo caso si verifica soltanto sulle linee suburbane in cui circolano i soli treni suburbani, che effettuano tutte le fermate e utilizzano lo stesso materiale rotabile. Sulle linee tradizionali invece si ha un'elevata eterotachia (treni merci convivono con treni intercity), mentre sulle linee ad alta velocità, pur essendo il materiale rotabile omogeneo, sono diversi i servizi proposti (con treni diretti oppure effettuanti più fermate lungo il tragitto).

- *Velocità costante*

Il grafico prodotto permette un confronto tra i due sistemi per qualunque velocità di servizio. Tuttavia la marcia di un treno non è rappresentabile con un unico tratto di moto uniforme ma è composta da una serie di tratti a velocità costante, intervallati da tratti di accelerazione e decelerazione. Pertanto come fare a leggere la potenzialità se non si sa a quale velocità fare riferimento? Non ci si può riferire alla velocità di regime, perché in alcuni tratti i treni circolano a velocità inferiori, non sarebbe corretto nemmeno assumere come velocità la media, perché è nei tratti di accelerazione e decelerazione in cui si hanno le maggiori restrizioni alla capacità che condizionano la capacità di tutta la linea. In

generale si può dire che non c'è una velocità che può essere correttamente assunta come rappresentativa.

- *Utilizzo del solo parametro di treni/ora*

Questo metodo esprime con un unico indice la capacità della linea: il numero di treni che possono circolare in un'ora. Recentemente è stata prospettata da molti autori la necessità di non limitarsi al dato puramente numerico di treni/ora, ma di considerare altri importanti parametri che assieme ad esso danno un significato più ampio al termine capacità. Essi potrebbero ad esempio essere quelli proposti da Barter [7], come livello di sicurezza, rispetto delle richieste commerciali, livello di puntualità, ecc.

Si consiglia quindi di utilizzare il metodo di Poggio per una stima iniziale, con la consapevolezza che il risultato ottenuto non corrisponde al valore corretto ma può essere assunto come prima approssimazione di capacità. Il suo significato è limitato al numero di treni che possono circolare nel tempo di riferimento, senza ulteriori indicazioni su puntualità, livello di servizio, stabilità ecc.

3.4 UIC CODE 406

3.4.1 Introduzione

Il metodo di calcolo della capacità in ambito ferroviario proposto nell'UIC CODE 406 [8] vuole essere alla base di un metodo univocamente condiviso in ambito internazionale. Infatti una diversa concezione e procedura di calcolo della capacità per ciascun Gestore Ferroviario comporterebbe una difficile interoperabilità di un traffico internazionale in costante crescita.

Questo metodo si basa sull'orario grafico esistente, relativo all'infrastruttura studiata. In particolare si prende in considerazione l'orario grafico di un tratto di linea per una determinata finestra temporale e si procede successivamente alla compressione delle tracce orario che costituiscono l'orario stesso. Questa compressione permette di determinare la cosiddetta *occupazione dell'infrastruttura*. Sul tratto di linea considerato, la composizione del traffico, il numero dei treni e le caratteristiche del segnalamento devono rimanere invariati. Il *consumo di capacità* viene espresso in termini di occupazione dell'infrastruttura, alla quale viene poi aggiunto

un *margin*e necessario alla stabilizzazione dell'orario e, quando necessario, di un *tempo dedicato alla manutenzione*.

Se l'occupazione dell'infrastruttura così calcolata è maggiore di un valore tipico, allora l'infrastruttura deve essere considerata congestionata. Altrimenti, se il valore tipico non viene raggiunto, si ha un margine di capacità che potrà essere sfruttato. Il valore tipico, che non può essere superato dall'occupazione dell'infrastruttura, non è univocamente determinato ma può essere solamente stimato sulla base dell'esperienza.

3.4.2 Parametri alla base della capacità

Per una data infrastruttura, la capacità è basata sull'interdipendenza tra i seguenti fattori:

- **Numero dei treni** (per unità di tempo, ad esempio treni/ora). All'aumentare del numero dei treni, il tempo rimanente per la qualità del servizio diminuisce;
- **Velocità media**. La distanza di arresto e quindi il distanziamento tra due treni consecutivi aumenta con il quadrato della velocità;
- **Stabilità**. Al fine di assorbire piccoli ritardi è necessario prevedere adeguati margini di tempo in aggiunta al tempo di occupazione dell'infrastruttura del singolo treno;
- **Eterogeneità**. Il *consumo di capacità* aumenta all'aumentare della differenza tra i tempi di percorrenza delle diverse tipologie di treni.

L'interazione di questi 4 fattori può essere espressa graficamente attraverso il cosiddetto "bilancio di capacità":

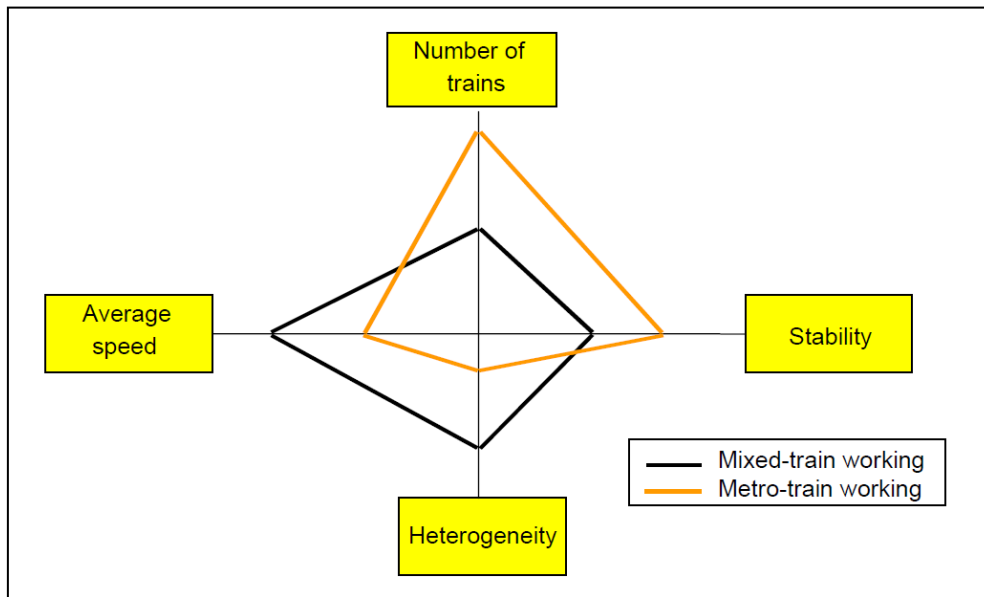


Figura 3.4.1: Esempio di rappresentazione grafica della capacità secondo l'UIC

Data una linea, una volta fissati i valori di velocità media dei treni, eterogeneità del traffico e stabilità dell'orario, è possibile definire univocamente come capacità il numero massimo di treni prevedibili in una determinata finestra temporale.

3.4.3 Calcolo del consumo di capacità

La capacità non può essere direttamente calcolata, mentre il consumo di capacità è l'unico valore che può essere calcolato in modo oggettivo. Il consumo di capacità deve essere calcolato rispetto ad una data sezione di linea attraverso la compressione delle tracce orario in una predefinita finestra temporale. Gli effetti di questa compressione sulle sezioni di linea vicine non vengono presi in considerazione in quanto tale metodologia operativa non porta a nessuna conclusione riguardo alla realizzabilità dell'orario sulle sezioni di linea attigue a quella di studio.

Analizzando il risultato della compressione può verificarsi che parte della capacità della linea sia ancora disponibile. Questa capacità inutilizzata può essere in parte utilizzabile, se è possibile inserire altre tracce orario di treni aggiuntivi, ed in parte inutilizzabile.

Lo studio del consumo di capacità deve essere condotto considerando le fasce orarie di picco di una giornata lavorativa, prendendo una finestra temporale di almeno 2 ore.

Ai fini della compressione, tutte le singole tracce orario dei treni appartenenti alla prescelta finestra temporale vengono unite con il minimo distanziamento teorico, senza considerare alcun margine. Questa compressione può essere effettuata mediante due tecniche:

- **Metodo Grafico:** attraverso l'analisi, nell'orario grafico, di ogni traccia orario ed il relativo tempo di blocco in ogni sezione;
- **Metodo Analitico:** attraverso un calcolo analitico del distanziamento minimo teorico tra ciascuna coppia di treni, mediante un software di calcolo.

È importante sottolineare che l'UIC CODE 406 prevede, nel processo di compressione delle tracce orario, che né il tempo di percorrenza della tratta né lo schema di sorpassi, incroci e fermate effettuate da ciascun treno possano essere modificati.

3.4.3.1 Metodo Grafico

Come precedentemente detto, si parte da un orario grafico reale o ipotizzato, riferito ad una data infrastruttura ferroviaria. Successivamente si prende una finestra temporale considerata significativa come mostrato in Figura 3.4.2:

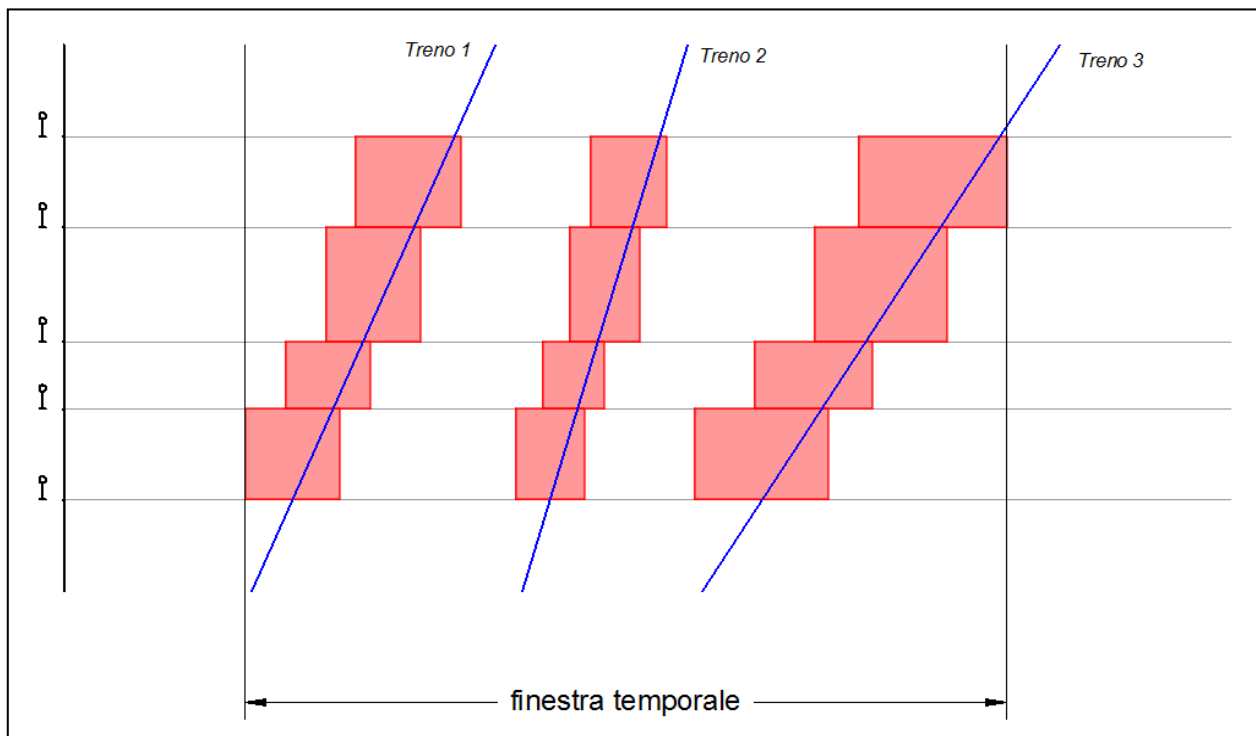


Figura 3.4.2: Esempio di orario grafico originale

A questo punto le tracce orario con i relativi tempi di occupazione delle singole sezioni di blocco vengono accostate le une sulle altre al fine di minimizzare il distanziamento temporale. Questo procedimento deve essere eseguito senza portare alla sovrapposizione dei tempi di occupazione lungo tutta la sezione di linea, come mostrato in Figura 3.4.3:

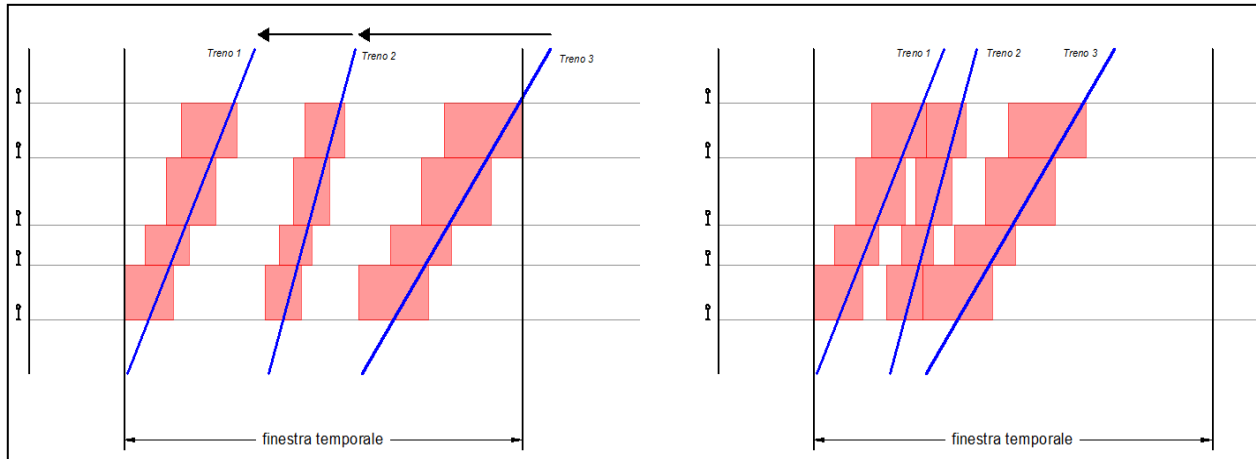


Figura 3.4.3: Procedura di compressione dell'orario grafico

Con questo metodo si valuta il massimo numero di tracce inseribili nella finestra temporale, ricordando che l'occupazione di infrastruttura comincia, sezione per sezione, nel primo istante di occupazione della sezione stessa.

3.4.3.2 Metodo Analitico

Il metodo analitico, invece, permette di calcolare il minimo distanziamento temporale che deve esistere tra due treni successivi all'inizio del tratto di linea considerata. A tal fine le tracce dei due treni vengono fatte coincidere all'ingresso della linea; ciò comporta la sovrapposizione dei tempi di occupazione su almeno una sezione di blocco (Figura 3.4.4).

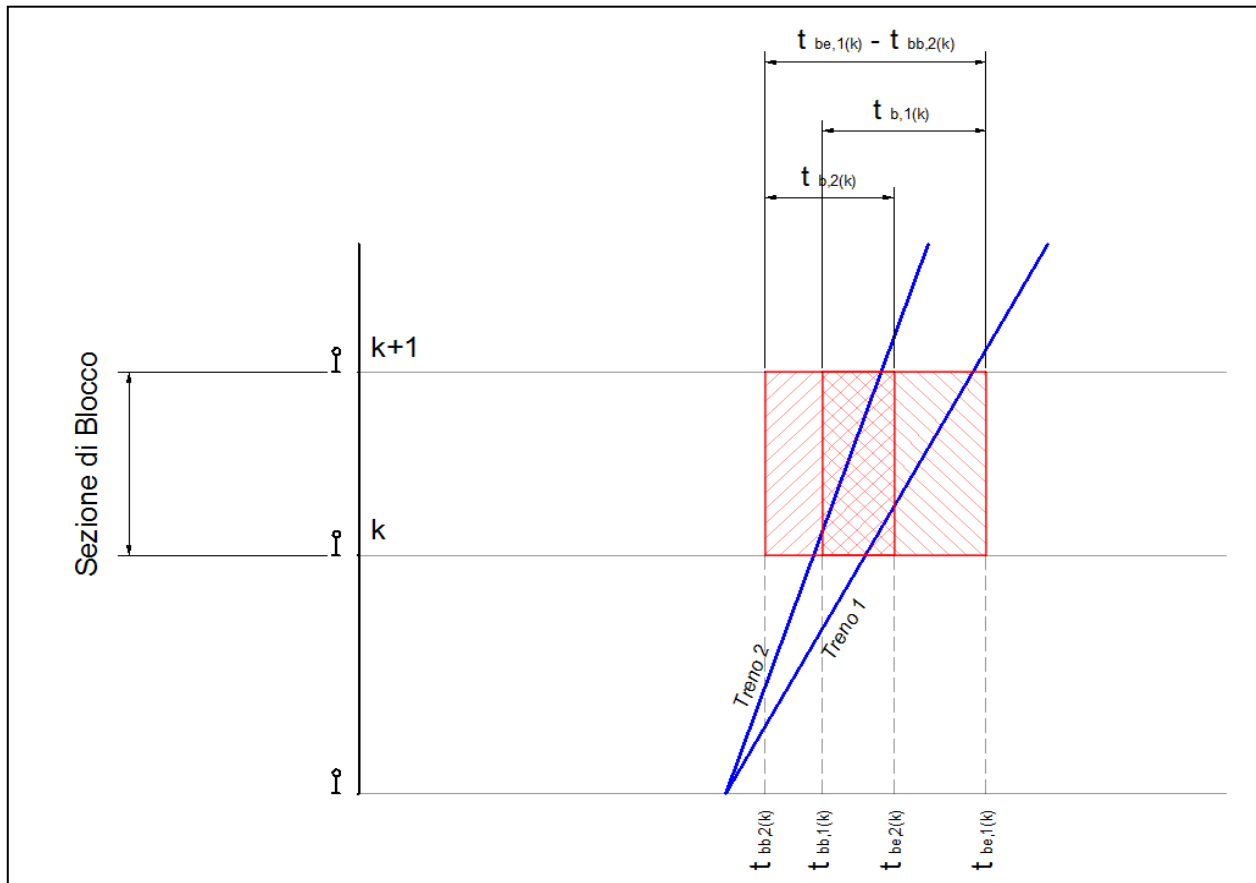


Figura 3.4.4: Principio di calcolo della sovrapposizione del tempo di blocco

Una volta calcolati tutti i tempi di sovrapposizione dei tempi di occupazione per i due treni considerati, il valore massimo di tale sovrapposizione rappresenta di quanto la partenza del secondo treno deve essere posticipata rispetto a quella del primo. In questo modo saranno eliminate tutte le sovrapposizioni nell'intero tratto di linea.

Quanto detto può essere tradotto in termini matematici dalla seguente formula:

$$t_{d,ij} = \text{MAX} \{t_{be,1(k)} - t_{bb,2(k)}\} \quad \text{per } k = 1, \dots, n_b$$

Dove:

- $t_{d,ij}$ distanziamento minimo in partenza tra il treno j che segue il treno i ;
- $t_{be,1(k)}$ istante di fine del tempo di blocco del treno 1 nella sezione di blocco k ;
- $t_{bb,2(k)}$ istante di inizio del tempo di blocco del treno 2 nella sezione di blocco k ;
- n_b numero delle sezioni di blocco.

3.4.4 Tempo di blocco della singola sezione di blocco

Una volta definita la traccia oraria del singolo treno, si procede al calcolo del tempo di occupazione di ciascuna sezione di blocco. Come è possibile vedere dalla Figura 3.4.5, tale tempo di occupazione è composto da vari tempi elementari:

- **Tempo per la formazione dell'itinerario.** Tempo necessario alla tecnologia di segnalamento per ricevere ed elaborare le informazioni ed infine cambiare l'aspetto del segnale di avviso;
- **Tempo per l'avvistamento del segnale.** Tempo necessario al personale di macchina per avvistare il segnale a terra e compiere la conseguente azione;
- **Tempo di approccio.** Tempo necessario al treno per percorrere la sezione di approccio (sia essa lo spazio tra il segnale di avviso e quello di protezione o tra due segnali di protezione consecutivi qualora non siano previsti segnali di avviso);
- **Tempo di percorrenza della sezione di blocco.** Tempo trascorso tra l'ingresso della testa del treno nella sezione di blocco considerata e l'uscita della testa del treno dalla sezione stessa;
- **Tempo di liberazione.** Dipende dalla lunghezza del treno e dalla posizione relativa dei contatti elettrici rispetto al segnale di liberazione della sezione;
- **Tempo per il rilascio dell'itinerario.** Tempo necessario alla tecnologia di segnalamento per ricevere ed elaborare le informazioni ed infine cambiare l'aspetto del segnale di protezione.

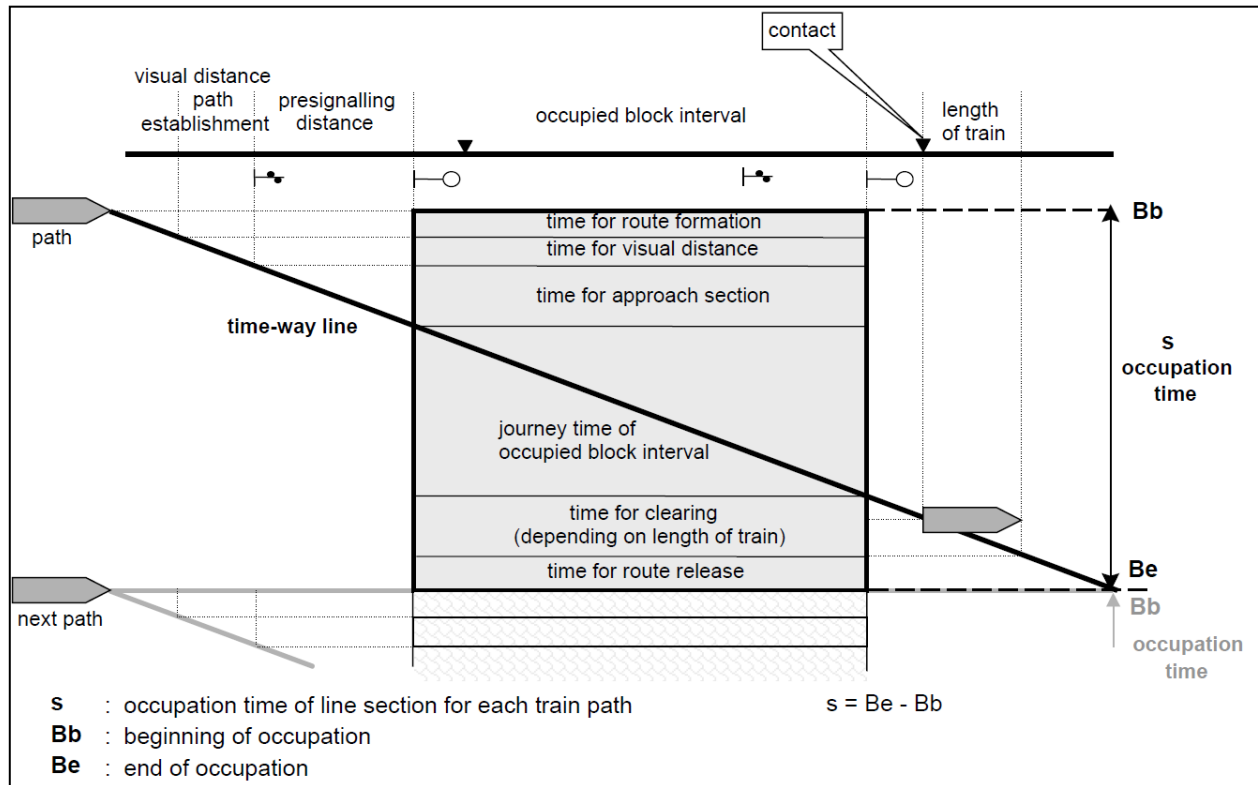


Figura 3.4.5: Composizione del tempo di blocco di una sezione

3.4.5 Metodo di calcolo

Il consumo di capacità deve essere misurato in termini di occupazione dell'infrastruttura, alla quale deve essere aggiunto un ulteriore tempo per la stabilizzazione dell'orario e, se necessario, per le attività di manutenzione.

Come è possibile vedere dalla Figura 3.4.6, il consumo di capacità (k) viene calcolato dalla seguente formula:

$$k = a + b + c + d$$

Dove:

- k è il consumo di capacità totale [min];
- a è l'occupazione dell'infrastruttura [min];
- b è il margine di tempo [min];
- c è il tempo aggiuntivo per linee a singolo binario [min];
- d è il tempo aggiuntivo per le attività di manutenzione [min].

La somma dei tempi *b*, *c* e *d* viene indicata, nel presente lavoro, con il termine *tempo di sicurezza* (*T.S.*).

In termini percentuali il consumo di capacità viene espresso mediante:

$$K = \frac{k}{U} \cdot 100$$

Dove:

- *K* è il consumo di capacità [%];
- *U* è la finestra temporale considerata [min].

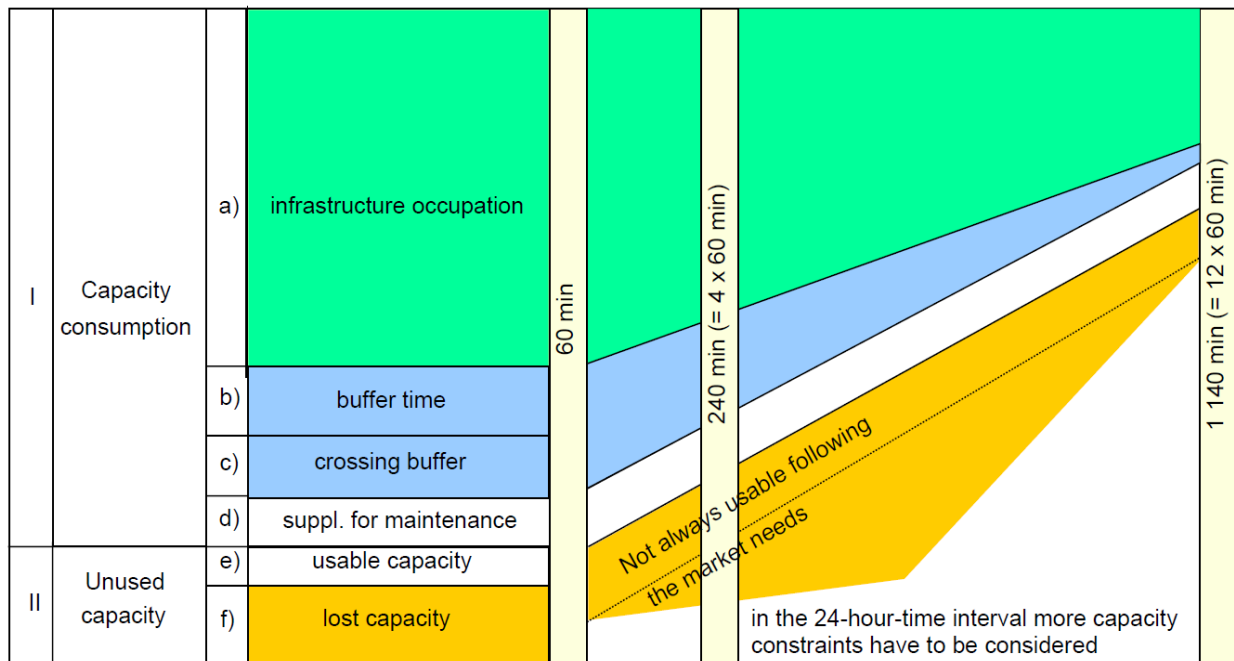


Figura 3.4.6: Determinazione del consumo di capacità e della capacità inutilizzata

L'occupazione dell'infrastruttura deriva dal processo di compressione precedentemente esposto. La capacità inutilizzata, invece, è data dalla differenza tra la finestra temporale considerata ed il consumo di capacità. La capacità inutilizzata può essere scomposta in due tempi distinti:

- **Capacità utilizzabile.** È la porzione di capacità inutilizzata che può essere occupata da nuove tracce orario;
- **Capacità persa.** È la porzione di capacità inutilizzata in cui non è più possibile inserire ulteriori tracce orario.

3.4.6 Processo applicativo

Il processo per il calcolo della capacità mediante il metodo fornito dall'UIC CODE 406 può essere schematizzato nei seguenti passaggi:

1. Innanzitutto si procede alla compressione dell'orario grafico considerato;
2. Il valore dell'occupazione dell'infrastruttura (espressa in % rispetto alla finestra temporale considerata) viene confrontato con il "valore tipico" relativo a quella specifica infrastruttura (Tabella 3.4.1);
3. Se il valore dell'occupazione dell'infrastruttura risulta maggiore del "valore tipico" allora la sezione di linea considerata viene dichiarata congestionata ed il procedimento termina qui;
4. Se il valore dell'occupazione dell'infrastruttura risulta minore del "valore tipico" allora il processo di analisi della capacità continua;
5. Si cerca di inserire nuove tracce orario di treni aggiuntivi attraverso la consueta tecnica di compressione;
6. Se tale aggiunta non risulta possibile in quanto il valore aggiornato dell'occupazione dell'infrastruttura risulta maggiore del "valore tipico", allora la rimanente capacità prende il nome di capacità persa e non può essere utilizzata in altro modo;
7. Se tale aggiunta risulta possibile, in quanto il valore aggiornato dell'occupazione dell'infrastruttura risulta minore del "valore tipico", allora la rimanente capacità prende il nome di capacità utilizzabile;
8. Questa procedura deve essere ripetuta fino a quando l'occupazione dell'infrastruttura raggiunge il valore di congestione oppure quando non è più possibile inserire ulteriori tracce orario.

Il consumo di capacità così ottenuto definisce la **capacità pratica** ovvero il numero massimo di treni prevedibile nella finestra temporale considerata, garantendo i margini di tempo previsti. Nel presente lavoro tali margini vengono desunti dai "valori tipici" di occupazione dell'infrastruttura trattati nel paragrafo seguente.

Si definisce invece **capacità teorica** il massimo numero di treni prevedibile nella finestra temporale considerata senza margini di tempo.

3.4.7 Valori tipici di occupazione dell'infrastruttura

I valori tipici che l'UIC CODE 406 prescrive di non superare sono il risultato dell'applicazione di tale metodo su circa 3'000 km di linee ferroviarie europee. I valori massimi di occupazione dell'infrastruttura sono stati raccolti nella Tabella 3.4.1:

Tipo di linea	Ora di picco	Commenti
Linea suburbana dedicata al traffico passeggeri	85%	La possibilità di sopprimere alcuni treni permette alti livelli di utilizzazione della capacità.
Linea ad Alta Velocità	75%	
Linea a traffico misto	75%	Può essere maggiore quando il numero dei treni è basso (minore di 5 treni per ora) con forte eterogeneità.

Tabella 3.4.1: Valori tipici di occupazione dell'infrastruttura suggeriti dall'UIC

Tali valori vengono proposti come "valori raccomandati" in quanto ci sono diversi fattori che devono essere considerati:

- l'affidabilità dell'infrastruttura;
- l'affidabilità del materiale rotabile;
- l'interdipendenza tra le varie sezioni di linea;
- il livello della qualità del servizio;
- il numero dei treni per ora;
- la lunghezza della sezione di linea e la possibilità di effettuare sorpassi o attraversamenti.

3.5 Rappresentazione grafica della capacità

Nello studio di Landex, *Methods to Estimate railway capacity and Passenger Delays* [12], viene proposta una rappresentazione grafica del concetto di capacità espresso nell'UIC CODE 406.

Si propone di rappresentare tramite una piramide i fattori determinanti la capacità dell'infrastruttura. Come anticipato nel paragrafo 3.4.2, essa non può essere direttamente calcolata, ma dipende da quattro parametri analitici (numero di treni, velocità media, eterogeneità e stabilità) e può essere espressa graficamente attraverso il "bilancio di capacità". La sua rappresentazione è un grafico a quattro assi come quello mostrato in Figura 3.5.1. Ciò che è

possibile calcolare è il consumo di capacità, con i metodi descritti nel paragrafo 3.4.3. Pertanto Landex propone di sintetizzare il tutto mediante una piramide avente come base il bilancio di capacità e come altezza il consumo di capacità.

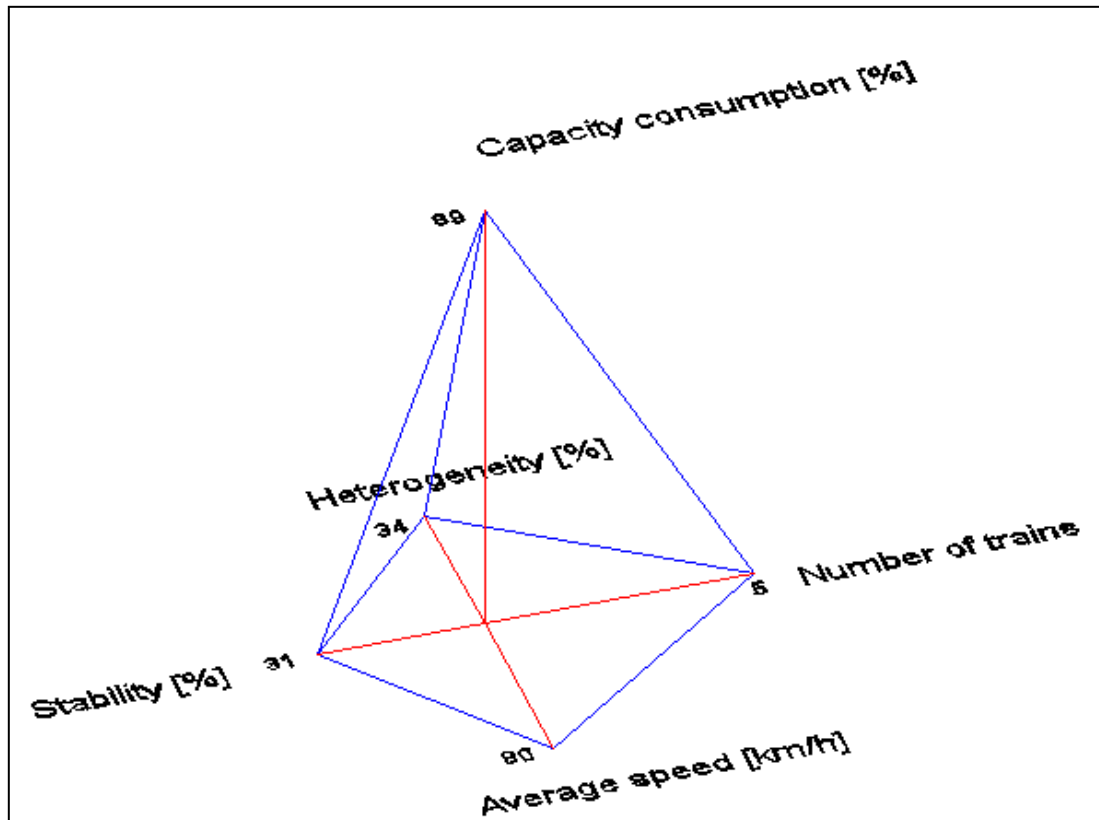


Figura 3.5.1: Rappresentazione grafica della capacità proposta da Landex

Una rappresentazione ulteriormente più efficace consiste nell'inscrivere detta piramide all'interno di un'altra, definita dai massimali dei valori assumibili dai 5 parametri: il 100% per le percentuali, la velocità di tracciato per quanto riguarda la velocità media ed un numero di treni massimo fittizio.

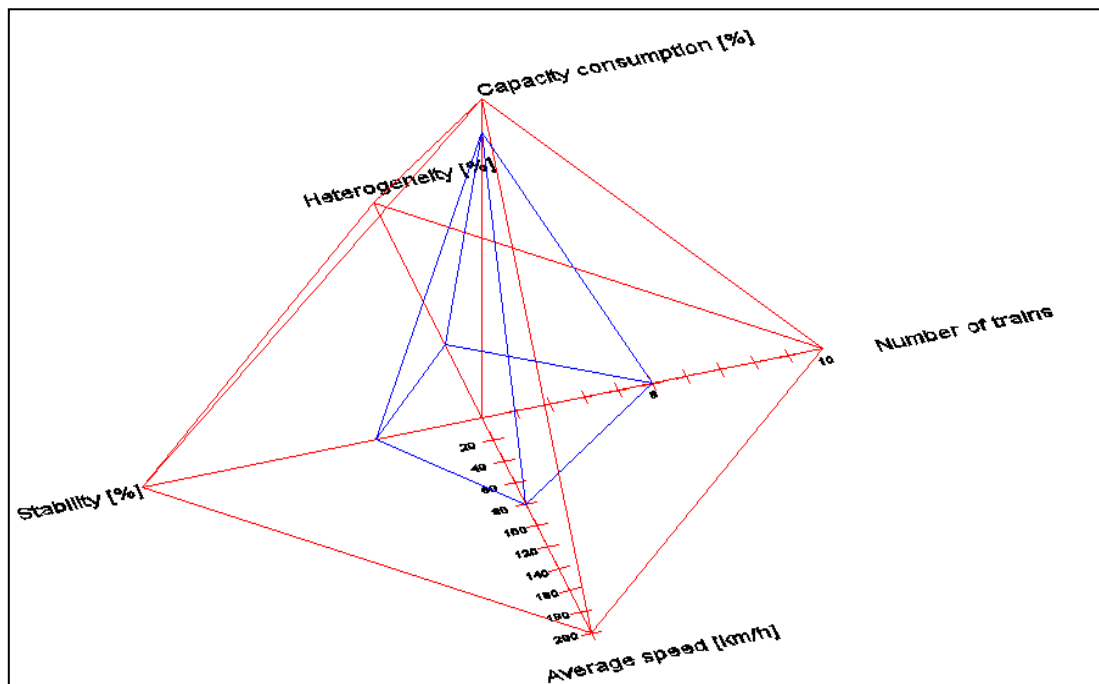


Figura 3.5.2: Esempio di rappresentazione grafica della capacità

Un grafico di questo tipo consente di confrontare la capacità della stessa linea in diversi scenari, avendo a portata di mano i vari parametri di interesse. Ad esempio si può vedere se l'aumento del numero di treni che si ha passando da uno scenario ad un altro vada a discapito della stabilità, oppure se l'aumento di eterogeneità riduce la velocità media, e così via.

Di seguito si dà una definizione precisa di ciascuno dei cinque parametri utilizzati. Essi sono da calcolarsi posteriormente al metodo di compressione enunciato nel paragrafo 3.4.6.

3.5.1 Numero di treni

Il suo significato è immediato, è la capacità pratica.

3.5.2 Velocità media

Essa è la media delle velocità tenute mediamente dai treni:

$$velocità\ media = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_{m,i}$$

Dove:

- n è il numero di treni previsti dall'orario grafico, che risulta dall'applicazione del metodo di calcolo del consumo di capacità;
- $v_{m,i}$ è la velocità media di percorrenza della linea da parte dell'*i-esimo* treno.

3.5.3 Stabilità

La stabilità viene definita come somma dei seguenti tempi (considerati in percentuale rispetto alla finestra temporale):

- margine di tempo;
- tempo aggiuntivo per le attività di manutenzione;
- tempo inutilizzato.

Si considera in sostanza tutto il tempo che non fa parte dell'occupazione di infrastruttura, che costituisce il margine di tempo disponibile per recuperare eventuali ritardi e perturbazioni di traffico.

3.5.4 Eterogeneità

Per il calcolo dell'eterogeneità si fa uso dell'*indice di eterogeneità* di Gini:

$$Eterogeneità = 100 \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n f_i^2 \right) = 100 \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{n} \right)^2 \right)$$

Dove:

- n è il numero di treni previsti dall'orario grafico, che risulta dall'applicazione del metodo di calcolo del consumo di capacità;
- f_i è la frequenza con cui compare nel campione la modalità i ;
- n_i è il numero di volte in cui compare nel campione la modalità i .

Per "modalità" si intende una ben definita traccia oraria. Tutti i treni aventi la stessa traccia (ugual tempo di percorrenza e medesime fermate) appartengono alla stessa modalità.

L'indice di eterogeneità che ne deriva è un risultato qualitativo, in quanto non considera quanto diverse siano due modalità tra loro. Si considerino per assurdo due casi per una medesima linea.

Nel primo l'orario grafico presenta due treni, entrambi veloci ma con traccia oraria diversa. L'eterogeneità risulterebbe pari al 50%. Nel secondo si consideri la stessa linea in cui però l'orario grafico prevede un treno veloce ed uno merci. Anche in questo caso le modalità sono due e i treni due, pertanto l'eterogeneità risulta ancora del 50%, sebbene intuitivamente è evidente che le tracce orario siano maggiormente diverse tra loro.

Bisogna quindi tenere presente quanto osservato. In alcuni casi è opportuno assimilare alla stessa modalità treni che hanno tracce orario simili (ad esempio due treni veloci che effettuano fermate diverse), in modo che il risultato sia più rappresentativo.

3.5.5 Consumo di capacità

Esso è calcolato secondo i dettami dell'UIC CODE 406, descritti nel paragrafo 3.4.6.

4 TEORIA DELLA PROPAGAZIONE DEI RITARDI

4.1 Premessa

Lo studio della capacità di una linea ferroviaria imperturbata non esaurisce gli studi che devono essere svolti per valutare se un sistema di distanziamento è migliore di un altro.

Si consideri l'esempio di una linea gestita con un sistema di distanziamento particolarmente efficiente, su cui circolino convogli dalle prestazioni elevate. Queste due condizioni non sono sufficienti a garantire un servizio di qualità: occorre capire come il sistema reagisce ad una perturbazione all'orario di servizio (un guasto di un treno, la temporanea ostruzione della via ferrata, o altri eventi rari ma possibili).

I ritardi possono essere suddivisi in due gruppi:

- i **ritardi in ingresso** sono quei tempi persi quando un treno si presenta su di una linea ad un tempo successivo a quello previsto;
- i **ritardi di linea** sono invece le perdite di tempo che si generano (per svariati motivi) all'interno di una linea.

La valutazione dei secondi fornisce un'indicazione riguardo alla stabilità dell'orario di servizio.

Alcuni ritardi si verificano indipendentemente dalla presenza di altri convogli, si tratta dei ritardi in ingresso, delle fermate prolungate in stazione e di grandi ritardi dovuti a cause di forza maggiore (come guasti, interruzione dell'alimentazione elettrica, frane, ecc.). Questa prima categoria di ritardi può generarne ulteriori (questa volta dipendenti) nei treni seguenti. Tanto più i ritardi dipendenti si protraggono, tanto maggiori saranno i disagi patiti dai passeggeri dei vari treni coinvolti. La propagazione del ritardo si genera sia temporalmente che spazialmente: un treno che rallenta in linea, costringe il treno successivo a fermarsi (o a rallentare) in quanto trova davanti a sé l'infrastruttura occupata, a catena il secondo treno costringe il terzo a rallentare e così via. La propagazione coinvolge i treni che seguono quello che genera la perturbazione, quindi si può dire che essa risalga la linea in direzione opposta al verso di marcia.

La Figura 4.1.1 esplica graficamente quanto detto fin qui.

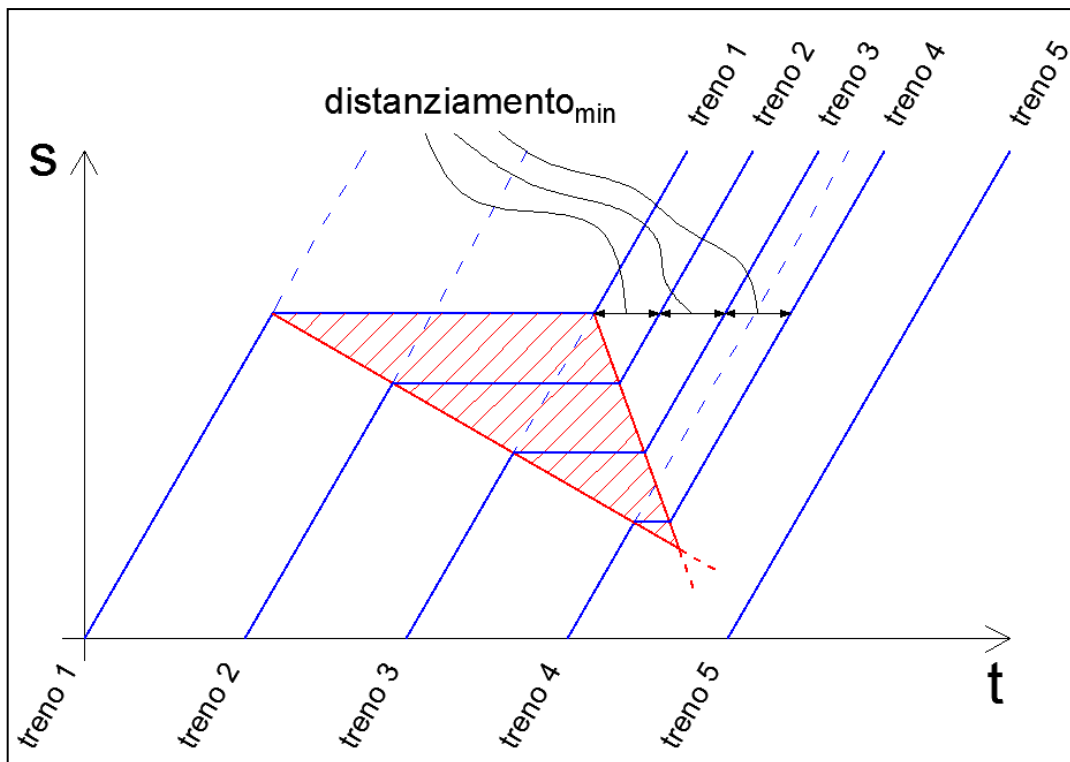


Figura 4.1.1: Cono di influenza della perturbazione

Si osserva che in generale i treni si presenteranno in linea con il distanziamento (temporale per semplicità) previsto dall'orario di servizio. Si ipotizza che ad un certo punto il primo treno si ferma; la circolazione potrà riprendere soltanto dopo che il primo treno è ripartito, osservando inoltre un intervallo minimo di distanziamento temporale tra i vari treni (per minimizzare il ritardo complessivo).

4.1.1 Analisi del fenomeno di propagazione di una perturbazione

Accattatis ha studiato il fenomeno di propagazione dei ritardi in condizioni di circolazione omotachica [13]. L'applicazione della teoria da lui esposta permette di generare le linee di propagazione che sono state utilizzate nella Figura 4.1.1.

Si analizza un orario cadenzato e veicoli viaggianti alla velocità V , con un distanziamento temporale τ e spaziale $d = V \cdot \tau$. Trascurando le fasi di moto vario, la transizione di velocità da V_A a V_B del treno perturbato (che verrà chiamato *treno 1*) costituirà l'origine di un sistema di riferimento relativo utilizzato per tracciare la retta di perturbazione.

Le equazioni delle traiettorie dei veicoli possono esprimersi nel modo seguente:

- $s_i = V_A \cdot t_i - (i - 1) \cdot d_A$
- $s_i = V_B \cdot t_i - (i - 1) \cdot d_B$

con $i=1,2,3,\dots,n$; n è l'ultimo veicolo coinvolto nella propagazione della perturbazione; d_A e d_B sono i distanziamenti spaziali riferiti alle velocità V_A e V_B .

Il sistema di queste due equazioni definisce la posizione spazio-temporale in cui l' i -esimo veicolo cambia velocità di marcia:

$$s_i = (i - 1) \cdot (-V_A \cdot d_B + V_B \cdot d_A) / (V_A - V_B)$$

$$t_i = (i - 1) \cdot (d_A - d_B) / (V_A - V_B)$$

Il rapporto s_i/t_i è indipendente dal parametro i e dipende solo dalle grandezze che definiscono le due situazioni di marcia A e B. Esprime cioè il fatto che il luogo dei punti in cui avviene il cambiamento di traiettoria è una retta di inclinazione:

$$\frac{s_i}{t_i} = tg\varepsilon = \frac{d_A \cdot V_B - d_B \cdot V_A}{d_A - d_B} = W_{AB}$$

Nel piano $s-t$ la $tg\varepsilon$ ha le dimensioni di una velocità: rappresenta la velocità W_{AB} con cui si propaga nello spazio la perturbazione costituita dal cambiamento di condizioni di marcia.

In conseguenza del sistema di riferimento adottato, se risulta $tg\varepsilon < 0$ e quindi $W_{AB} < 0$, allora la perturbazione si propaga a monte rispetto alla posizione in cui si è originata; viceversa se risulta $tg\varepsilon > 0$ e quindi $W_{AB} > 0$, allora la perturbazione si propaga a valle.

Se $tg\varepsilon = 0$ vuol dire che la perturbazione resta localizzata nella posizione in cui è avvenuta e si propaga solo nel tempo.

Dividendo il numeratore e il denominatore dell'equazione precedente per il prodotto $d_A \cdot d_B$, si ottiene:

$$W_{AB} = \frac{1/\tau_B - 1/\tau_A}{1/d_B - 1/d_A}$$

Se si tiene presente che gli inversi degli intervalli in tempo e in spazio fra i veicoli rappresentano una densità temporale (comunemente chiamata *flusso veicolare* Q , esprimibile in veicoli transitanti per unità di tempo) e spaziale (comunemente chiamata *densità veicolare* K , esprimibile in veicoli presenti sull'unità di lunghezza della via), si può scrivere la velocità di propagazione della perturbazione in relazione a queste due ultime grandezze:

$$W_{AB} = \frac{Q_A - Q_B}{K_B - K_A} = \frac{\Delta Q}{\Delta K}$$

Da qui risulta che cambiamenti nelle condizioni di marcia che comportino variazioni dello stesso segno per flussi e densità si propagano a valle; viceversa se le variazioni sono di segno opposto si propagano a monte. Pertanto per conoscere l'effetto di una perturbazione occorre conoscere le condizioni di marcia prima che essa avvenga e conoscere o ipotizzare in maniera opportuna le condizioni di marcia in conseguenza del verificarsi della medesima.

Questo è quello che in linea teorica avviene anche nella circolazione stradale. In ambito ferroviario la questione è però più complessa rispetto a quanto finora detto, perché i distanziamenti dipendono da alcuni fattori, e questi sono diversi nel caso di Blocco Fisso e Blocco Mobile.

Se si volesse sfruttare al massimo la capacità della linea senza margini di tempo, si avrebbe che alla minima perturbazione tutti i treni successivi ne risentirebbero per un tempo indefinito. Per evitare questo evento critico è indispensabile interporre dei margini tra due tracce successive, in cui l'infrastruttura rimane libera. Come detto infatti, le due linee di perturbazione dipendono dalla differenza di velocità e dal distanziamento a regime. Se il distanziamento prima e dopo l'evento è il medesimo, essendo anche i delta velocità uguali, le due linee risulterebbero parallele e la propagazione sarebbe infinita nello spazio e nel tempo.

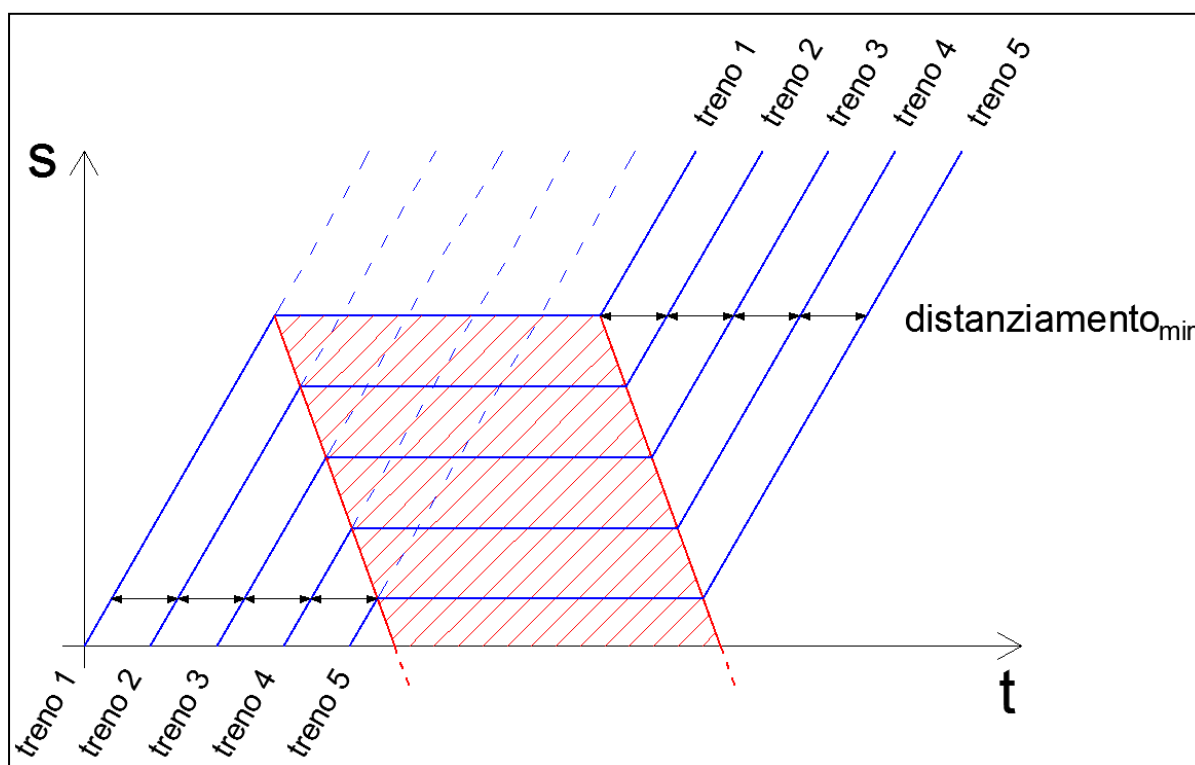


Figura 4.1.2: Cono di influenza della perturbazione in assenza di margini di tempo

Come si vede in Figura 4.1.2, un orario in cui i treni viaggiano con distanziamento minimo non ha possibilità di recupero dei ritardi, che coinvolgono un numero infinito di treni.

Lo studio della propagazione dei ritardi risulta anche utile nella determinazione dei margini di tempo. Se ne può valutare e studiare l'opportuna entità, tale da garantire un determinato livello di servizio, ossia un limite massimo di tempo di estinzione del ritardo, un numero massimo di treni coinvolti o l'ammontare massimo dei ritardi all'arrivo dei treni.

Nello studio che verrà eseguito, occorrerà innanzitutto stabilire un metodo per decidere quali ritardi considerare, quanti, in quale entità e in quali condizioni di traffico. Tutti questi fattori costituiscono situazioni diverse, di cui occorre selezionare le più rappresentative e su di esse trarre delle conclusioni generali.

E' stata presentata l'analisi della propagazione delle perturbazioni ad uno scopo introduttivo, lo studio che verrà compiuto nel capitolo 8 segue una procedura più rispondente alla realtà, infatti il metodo esposto da Accattatis, che ha il pregio di essere di immediata applicazione, ha il limite di considerare variazioni di velocità istantanee e circolazione omotachica.

4.2 Metodo UIC di inserimento e valutazione dei ritardi

Occorre stabilire una metodologia di inserimento dei ritardi nell'orario di servizio e di valutazione delle conseguenze. Il progetto dell'UIC di produrre un metodo comune di assegnazione di capacità alle linee ferroviarie si è sviluppato in tre fasi di studio. Nella **prima fase** l'UIC ha chiarificato la terminologia ed ha elaborato la metodologia di assegnazione della capacità. Nella **seconda fase** questa metodologia è stata testata dall'UIC su più di 5'000 km di differenti linee ferroviarie europee e quindi è stato redatto l'UIC CODE 406 (presentato in questo lavoro al paragrafo 3.4 e poi utilizzato nei successivi paragrafi). E' stata quindi lanciata una **terza fase** al fine di approfondire meglio il legame tra il livello di occupazione dell'infrastruttura e la stabilità dell'orario, in modo da determinare fino a che punto spingersi con l'aumento di occupazione di infrastruttura.

L'UIC ha definito in questa terza fase un protocollo per l'applicazione e la valutazione dei ritardi [14].

I passaggi da eseguire sono i seguenti:

- si introduce l'orario grafico da testare;
- si calcola l'occupazione di infrastruttura in accordo con l'UIC CODE 406;
- si procede con un primo step di simulazione introducendo i ritardi statistici;
- si testano uno per uno i ritardi primari in aggiunta ai ritardi statistici;
- si raccolgono i risultati;
- si ripete il procedimento aumentando il numero di treni per studiare dei casi con maggior livello di occupazione di infrastruttura;
- si comparano i risultati e si costruisce una curva di tendenza;
- si stabiliscono i valori raccomandati, caso per caso, di occupazione massima di infrastruttura.

L'orario grafico da cui si parte è l'orario originale della linea ideale in esame.

4.2.1 Ritardi statistici

I ritardi mostrati nelle tabelle seguenti costituiscono la situazione base; vengono introdotti sia i ritardi all'entrata in linea sia come prolungamento del tempo di fermata in stazione. Si tratta di ritardi determinati da studi statistici eseguiti sulle reti europee.

E' stata riportata la media di treni che entrano in linea in ritardo e la media dei loro ritardi.

	Frequenza	Ritardo medio [min]
Treni AV e treni passeggeri a lunga percorrenza	0.3	4
Treni regionali	0.6	3
Treni merci	0.6	3

Tabella 4.2.1: Ritardi statistici in ingresso

I dati statistici riferiti alla fermata prolungata sono i seguenti.

	Frequenza	Ritardo medio [min]
Treni AV e treni passeggeri a lunga percorrenza	0.1	2
Treni regionali	0.1	1
Treni suburbani	0.1	0.5
Treni merci	0.1	5

Tabella 4.2.2: Ritardi statistici in corrispondenza delle fermate

4.2.2 Ritardi primari

I ritardi primari sono quei ritardi occasionali che generano forti perturbazioni alla circolazione e che sono quindi interessanti da studiare. Si considera come ritardo primario un arresto in linea di 15 minuti. Esso è da applicare in due punti diversi della linea e a due treni diversi. Questi quattro casi che sono stati definiti devono essere il più a sfavore di sicurezza possibile; occorre pertanto scegliere opportunamente a quali treni e dove applicarli esattamente.

4.2.3 Risultati

I risultati che devono essere ottenuti dal calcolo sono i seguenti:

- l'ammontare dei delta ritardo alla fine e all'inizio della linea per valutare se il ritardo viene recuperato o aumenta (il delta ritardo è dato dalla differenza tra il tempo in cui

transita in un punto il treno perturbato e il tempo in cui avrebbe dovuto transitare il treno imperturbato);

- la media dei delta ritardo di tutti i treni coinvolti;
- il tempo di esaurimento della propagazione (tempo trascorso dall'istante in cui è avvenuta la perturbazione fino al ristabilirsi della normale circolazione).

4.3 Adattamento del protocollo UIC al caso di studio

La procedura presentata dall'UIC è sicuramente uno strumento utile e preciso, che potrebbe essere impiegato nella nostra trattazione. Tuttavia, il livello di precisione scelto per il presente lavoro è tale da poter trascurare alcuni dettami del protocollo. Si sta infatti studiando una linea ideale al fine di trarre delle conclusioni che abbiano validità generale e risultati indicativi. Interessa, più che la soluzione precisa, l'individuazione del suo giusto ordine di grandezza.

Lo studio eseguito propone di considerare soltanto un ritardo primario, per osservare in quanto tempo la circolazione torna regolare senza ulteriori perturbazioni (non verranno quindi considerati i ritardi statistici). In pratica ciò equivale a determinare un limite inferiore al numero di treni coinvolti in un caso reale, il quale dipenderà dalla sequenza di distribuzione dei ritardi statistici, che può presentarsi in migliaia di combinazioni diverse.

La scelta effettuata si basa sulla volontà di determinare il minimo numero di treni sempre coinvolti. Sono comunque state eseguite delle prove per determinare se l'aggiunta dei ritardi statistici porta a risultati simili o se non sono confrontabili come ordine di grandezza, in modo da poter stimare l'errore compiuto rispetto all'applicazione rigorosa del protocollo UIC, il cui impiego non sarebbe stato concettualmente difficile, ma oneroso nei tempi, in quanto si sarebbero dovute generare centinaia di situazioni diverse.

Quindi, riassumendo, il protocollo seguito nel capitolo 8 è il seguente:

- introdurre l'orario grafico da testare;
- calcolare l'occupazione di infrastruttura in accordo con l'UIC CODE 406;
- procedere con un primo step di simulazione introducendo il ritardo primario (di 15 minuti) nella sezione più critica;

- raccolta dei risultati;
- ripetere il procedimento aumentando il numero di treni per studiare dei casi con maggior livello di occupazione di infrastruttura;
- comparare i risultati e costruire una curva di tendenza.

5 TRAZIONE ELETTRICA

In questo capitolo si descrivono la caratteristica meccanica e le fasi del moto per i veicoli ferroviari.

In seguito, vengono mostrati i dati e le informazioni tecniche riguardanti i treni che sono stati utilizzati per effettuare la simulazione di scenari di traffico su linee ideali. Con questi dati sono state costruite le tracce orario dei treni considerati.

5.1 Caratteristica meccanica

Un veicolo che deve compiere un certo tragitto si muoverà secondo una successione di stati che sono descritti dal secondo principio della dinamica [15]. La forza di accelerazione che descrive la velocità del veicolo è espressa dalla seguente relazione:

$$F_a = F_t - R = m_e \cdot \frac{dv}{dt}$$

dove:

- F_a è la forza accelerante;
- F_t è la forza di trazione generata dal motore, data dalla caratteristica meccanica del veicolo;
- R è la resistenza al moto che il veicolo incontra;
- m_e è la massa equivalente, comprendente l'effetto inerziale delle masse rotanti.

La caratteristica meccanica di un veicolo è un diagramma nello spazio velocità-forza nel quale viene riportato l'andamento della forza di trazione F_t in funzione della sua velocità di avanzamento v . Viene inoltre riportato nel diagramma anche la curva delle resistenze al moto in funzione della velocità, per poter leggere sul grafico la forza accelerante dalla differenza delle due quantità riportate.

5.1.1 Caratteristica meccanica ideale

Perché un motore fornisca una caratteristica ideale deve soddisfare i seguenti requisiti:

- alle basse velocità è necessaria una forza di trazione elevata affinché il veicolo acceleri fino a velocità maggiori;
- alle alte velocità non è necessaria un'elevata forza di trazione in quanto non è richiesta accelerazione ed il veicolo deve soltanto vincere le forze di resistenza al moto;
- i motori sono dimensionati rispetto alla potenza massima che possono fornire, l'ideale sarebbe sfruttare questa potenza continuamente, per non avere fasi in cui il motore sia sovradimensionato.

Dall'ultimo punto si ricava che, idealmente, il motore deve fornire una caratteristica meccanica a potenza costante. Dai primi due punti si deduce che, siccome alle bassa velocità serve una forza di trazione elevata e viceversa occorre una forza di trazione bassa alle alte velocità, la caratteristica ideale a potenza costante ($P = F_t \cdot v$) soddisfa tutti i requisiti. Il grafico corrispondente è un'iperbole equilatera come mostrato in Figura 5.1.1.

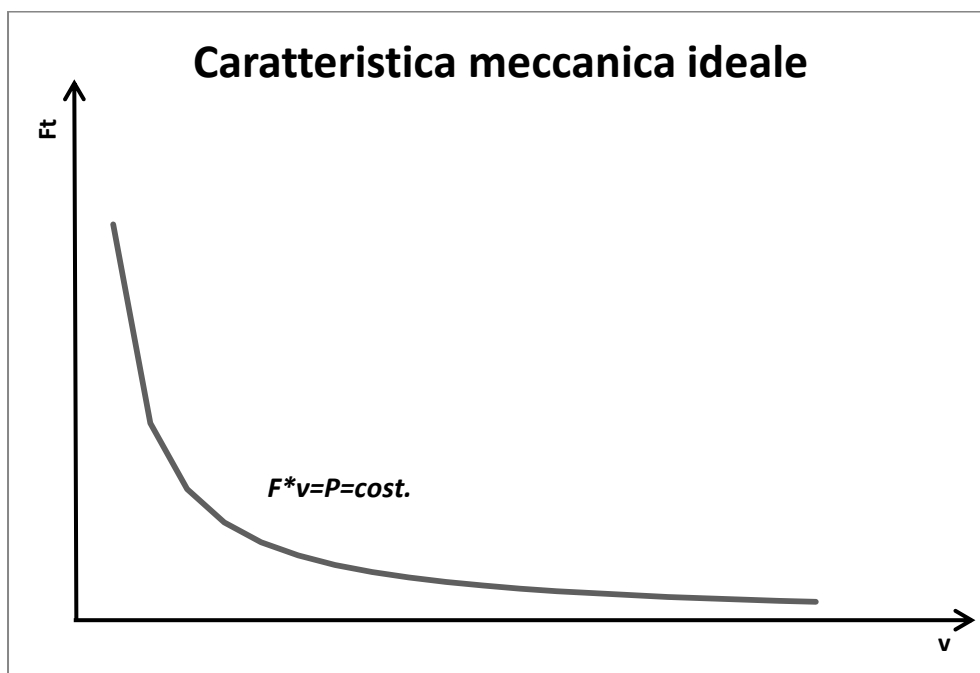


Figura 5.1.1: Caratteristica meccanica ideale teorica

Secondo la definizione fin qui data, si verificherebbe che a velocità nulla la forza di trazione sarebbe infinita. Un altro problema è che alle velocità più basse si avrebbe una forza di trazione troppo alta, che non è generalmente ammissibile. Quindi occorre porre un limite alla massima forza di trazione, in modo che rispetti i seguenti limiti:

- l'accelerazione non può superare una certa soglia, che rappresenta il limite di sopportazione per i passeggeri;
- la forza di trazione non può superare un certo valore massimo oltre il quale il motore andrebbe incontro a sollecitazioni meccaniche e termiche che lo porterebbero a danneggiarsi;
- la forza di trazione ha un limite nel fenomeno dell'aderenza, cioè nella forza che può essere trasmessa attraverso l'area di impronta tra ruota e terreno.

Il diagramma ideale della caratteristica meccanica prevede quindi una limitazione per le basse velocità (Figura 5.1.2).

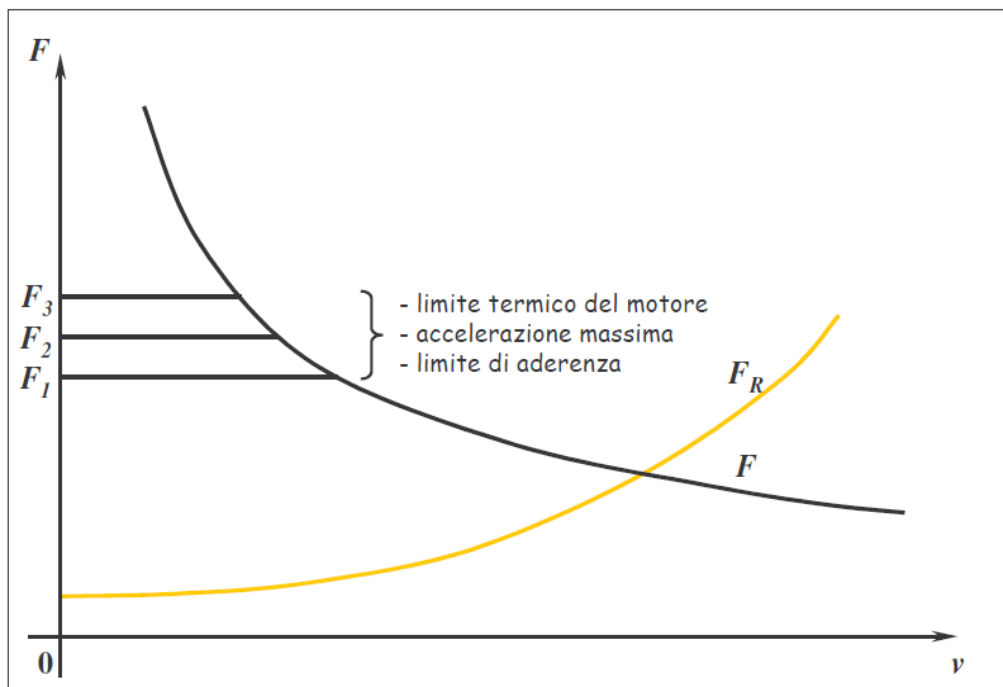


Figura 5.1.2: Caratteristica meccanica ideale reale

In sostanza la caratteristica meccanica dovrebbe idealmente avere un tratto pressoché costante fino ad un determinato valore di velocità, a partire dal quale si ha un secondo tratto a potenza costante.

Esistono due principali tipologie di motori elettrici: i motori a collettore a eccitazione serie ed i motori a induzione. Grazie ad opportune strategie di regolazione, facendo uso di azionamenti elettronici di vario tipo, è possibile ottenere con entrambi i tipi di motore una caratteristica molto prossima a quella ideale. Sebbene in un primo periodo è stato principalmente utilizzato il motore a

collettore, avente una caratteristica naturale più simile a quella ideale, a partire dagli anni Novanta l'evoluzione nel campo degli azionamenti elettronici ha permesso l'ottenimento della caratteristica ideale anche per i motori ad induzione. Fu così proprio questo tipo di motore a diventare il più conveniente tra i due in quanto, a parità di potenza erogata, è di inferiori dimensioni e più leggero di un motore a collettore.

5.1.2 Caratteristica meccanica dei motori ad induzione

La sua coppia allo spunto è sensibilmente più bassa rispetto alla coppia massima. La corrente all'avviamento ha un valore troppo elevato, incompatibile con le linee di alimentazione ferroviarie. Inoltre il motore tende a funzionare a velocità praticamente costante.

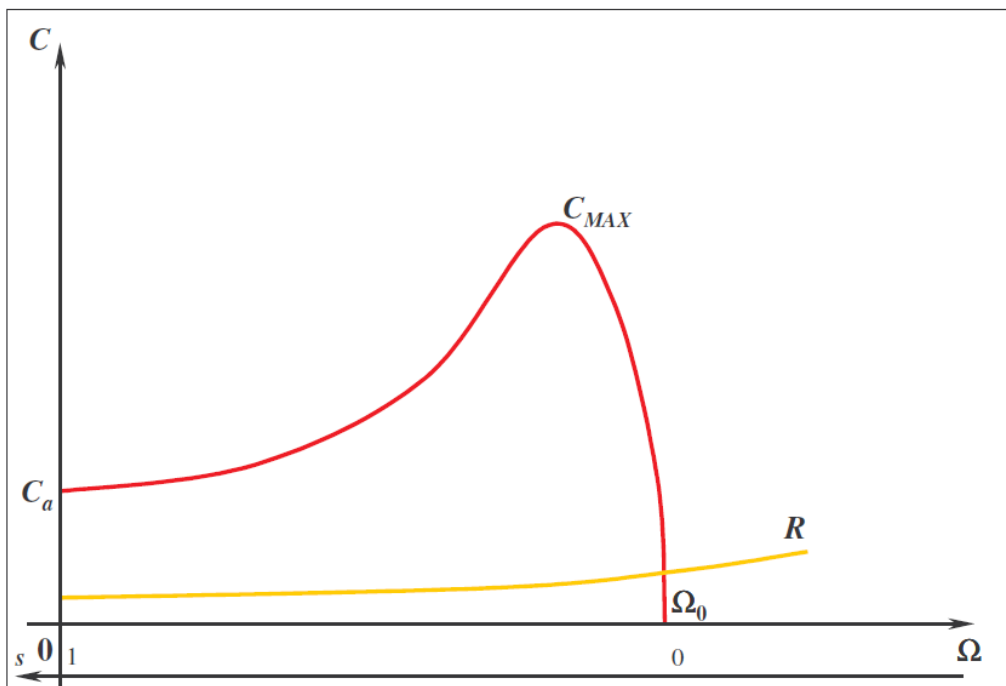


Figura 5.1.3: Caratteristica meccanica dei motori ad induzione

Come si può notare la caratteristica naturale è differente da quella ideale. Tuttavia, l'utilizzo degli invertitori consente di variare la tensione, la frequenza e l'intensità di corrente. In questo modo è possibile ottenere la curva di trazione desiderata.

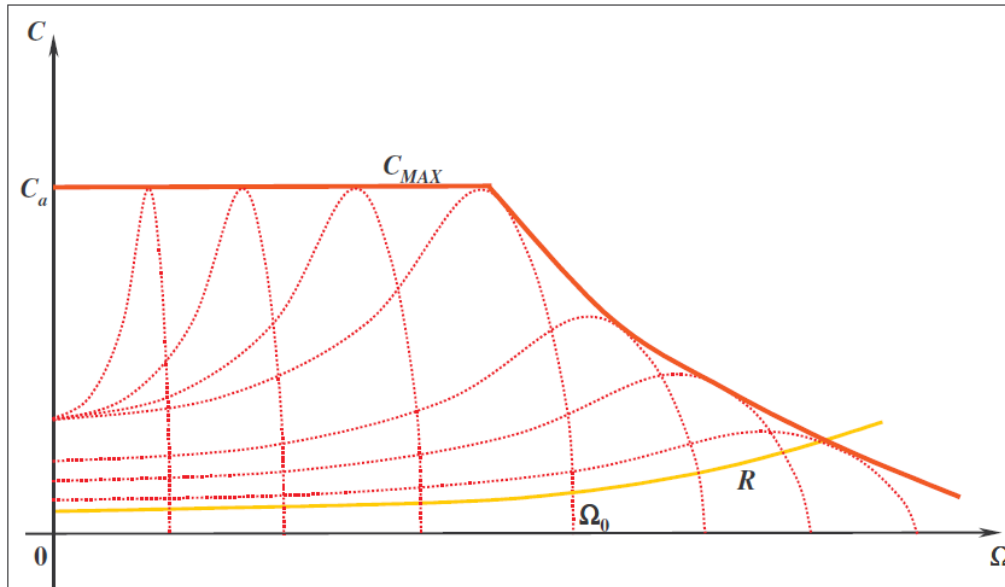


Figura 5.1.4: regolazione elettronica di un motore ad induzione

5.2 Resistenze al moto

Le resistenze che si oppongono al moto dei veicoli ferroviari sono dovute a vari fattori, in generale si usa raggrupparli in due categorie: le *resistenze in rettilineo ed in piano* e le *resistenze accidentali* [16].

Alle prime appartengono tutte le resistenze dovute agli attriti sempre presenti:

- perno della ruota - cuscinetto;
- ruota - strada;
- veicolo - aria.

RFI prevede l'utilizzo di una formula empirica per la stima di queste resistenze (R_0 in N):

$$R_0 = m \cdot g \cdot \left[1.94 + 2.65 \cdot \left(\frac{V^2}{100} \right) \right]$$

dove:

- V è la velocità espressa in km/h;
- m è la massa del convoglio ferroviario in ton.

Si è utilizzata la formula di RFI per velocità fino a 140/150 km/h, mentre per l'Alta Velocità si è invece utilizzata la formula binomia seguente:

$$R_0 = m \cdot g \cdot [0.904 + 0.00012 \cdot V^2]$$

Alle resistenze accidentali appartengono la resistenza per pendenza e la resistenza in curva. La loro espressione è rispettivamente:

$$R_i = m \cdot g \cdot i$$

$$R_c = m \cdot g \cdot r_c$$

dove:

- i è la pendenza della linea [‰];
- r_c è la resistenza specifica in curva, funzione del raggio della curva secondo la seguente tabella.

Raggio [m]	1'000	900	800	700	600	500	450	400	350	300	250	200	180
r_c [kg/tonn]	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.4	2.8	3.4	4.2	4.5

Tabella 5.2.1: Resistenze in curva

Nelle linee ideali che verranno in seguito utilizzate per effettuare i confronti di capacità con i diversi sistemi di distanziamento, si sono considerati per semplicità tracciati rettilinei e pianeggianti, pertanto le fasi del moto sono state calcolate considerando come resistenza complessiva la resistenza ottenuta con la formula proposta da RFI e con quella binomia.

5.3 Fasi del moto

In funzione dei diversi valori che può assumere la forza accelerante nell'equazione del moto, si possono instaurare diverse fasi del moto caratterizzate da un particolare valore di accelerazione.

5.3.1 Avviamento

Il veicolo fermo accelera fino a portarsi alla velocità di regime. Inizialmente la forza di trazione è pressoché costante, anche la resistenza per le basse velocità non varia molto, pertanto

l'accelerazione si mantiene costante. In seguito si raggiunge la potenza massima e la forza di trazione decresce fino all'annullamento della forza accelerante alla velocità di regime.

5.3.2 Moto a regime

Quando la forza di trazione eguaglia le resistenze, il veicolo si muove di moto uniforme. Grazie agli azionamenti elettronici la forza di trazione può essere modulata all'interno della regione definita dalla caratteristica meccanica, in modo da poter ottenere la velocità di regime desiderata al variare delle resistenze al moto.

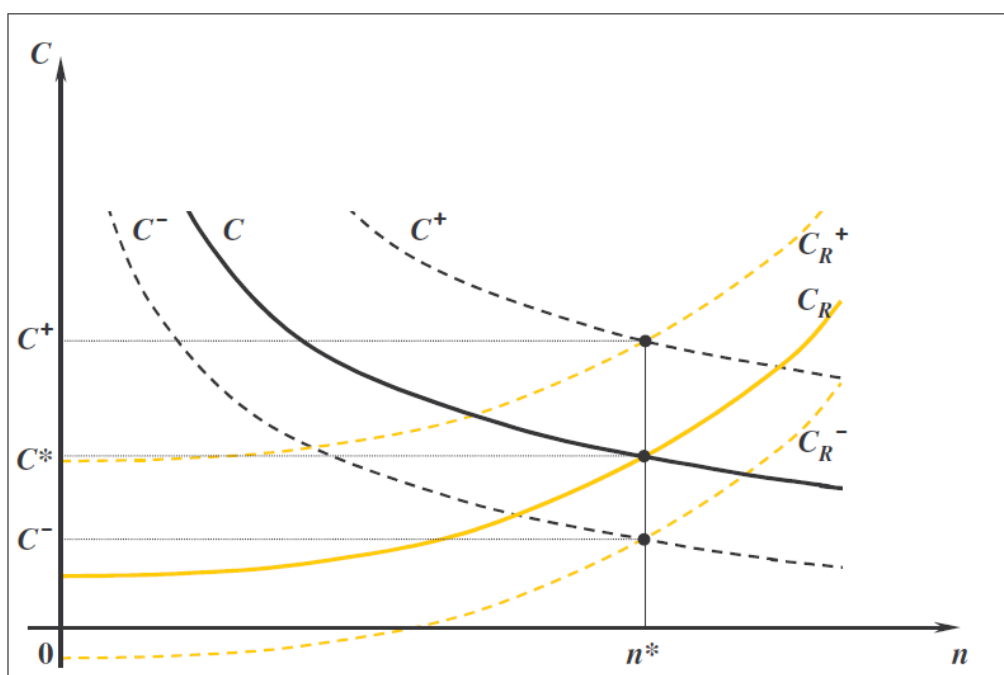


Figura 5.3.1: Regolazione della coppia al variare delle resistenze al moto

5.3.3 Lancio

In questa fase, detta comunemente anche *coasting*, si annulla la forza di trazione. Il veicolo procede per inerzia, rallentato dalle resistenze al moto. Questa modalità viene generalmente adottata per ridurre i consumi energetici del gestore dell' infrastruttura. Dato che le resistenze ferroviarie sono basse, se il tracciato è rettilineo e pianeggiante la velocità decresce lentamente e il lancio diventa una valida alternativa al moto a regime. Dopo lunghi tratti di coasting è necessario rilanciare la velocità con tratti di accelerazione per riportarsi alla velocità di regime.

5.3.4 Frenatura

Applicando una forza di trazione negativa si ottiene l'arresto del veicolo in tempi inferiori rispetto al caso del coasting. I valori di decelerazione adottati in servizio sono inferiori alla soglia di comfort per i passeggeri.

5.3.5 Diagramma di trazione

L'insieme di queste fasi, dal momento della partenza a quello dell'arrivo, definisce un grafico nello spazio tempo-velocità, chiamato *diagramma di trazione*.

Per realizzare il confronto di capacità con i due sistemi di distanziamento studiati, sono stati definiti dei casi ideali a cui applicare tale confronto. Sono state quindi introdotte delle linee e degli orari grafici rappresentativi. La preparazione degli orari ha richiesto la definizione delle tracce orario di alcuni treni caratteristici, che sono state ricavate dai loro diagrammi di trazione. Per la costruzione di tali diagrammi si è deciso di prevedere le fasi di accelerazione, marcia a regime e frenatura ed è stato necessario integrare l'equazione generale del moto alle differenze finite:

$$F_t - R = m_e \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \Delta t = m_e \cdot \frac{\Delta v}{F_t - R}$$

Non sono stati previsti esplicitamente tratti di lancio, ma avendo scelto una velocità di regime pari al 95% della velocità di tracciato, i tempi di percorrenza calcolati sono tali da poter includere tratti di accelerazione fino alla velocità di tracciato e successivo coasting fino a velocità più basse di quella di regime.

Per la linea suburbana che nel seguito verrà considerata, le quantità rappresentative per le fasi di moto sono quelle che nella seguente tabella sono chiamate di "servizio".

Valori limite	Valori in servizio
V_t	$V_{regime} = 95\% \cdot V_t$
$a_{max} = 0.9 \text{ m/s}^2$	$a_{servizio} = 70\% \cdot a_{max} = 0.63 \text{ m/s}^2$
$d_{max} = 1.1 \text{ m/s}^2$	$d_{servizio} = 70\% \cdot d_{max} = 0.77 \text{ m/s}^2$

Tabella 5.3.1: Valori limite e di servizio di accelerazione, decelerazione e velocità per la linea Suburbana

Dal momento che in caso di regolare esercizio la velocità tenuta a regime dai macchinisti è mediamente inferiore alla massima di linea, è stata considerata una velocità di servizio pari al 95% di quella massima ammessa.

Per le altre due linee considerate (Alta Velocità e Tradizionale), le quantità rappresentative per le fasi di moto sono riportate nella seguente tabella.

Valori limite	Valori in servizio
V_t	$V_{regime} = 95\% \cdot V_t$
$a_{max} = 0.9 \text{ m/s}^2$	$a_{servizio} = 60\% \cdot a_{max} = 0.54 \text{ m/s}^2$
$d_{max} = 1.1 \text{ m/s}^2$	$d_{servizio} = 70\% \cdot d_{max} = 0.77 \text{ m/s}^2$

Tabella 5.3.2: Valori limite e di servizio di accelerazione, decelerazione e velocità per le linee AV e Tradizionale

5.4 Materiale rotabile

In questo paragrafo si presentano i treni che sono stati considerati nel presente lavoro. Sulla linea suburbana il materiale rotabile è omogeneo e si tratta dell'elettrotreno del tipo TSR, gli stessi circolano anche sulla linea tradizionale assieme a treni del tipo ETR 610. Sulla linea ad alta velocità si sono utilizzati elettrotreni del tipo ETR 500. Di seguito si elencano le principali caratteristiche di questi treni e se ne riporta la caratteristica meccanica utilizzata nei calcoli.

5.4.1 Treno Suburbano

Il treno previsto per il servizio suburbano ha le seguenti caratteristiche.

TRENO SUBURBANO	
Tipo	Elettrotreno TSR
Lunghezza	131 m
Massa a vuoto	275 t
Massa in esercizio	346 t
Potenza massima continua	3'400 kW
Rodiggio elettromotrici	2'Bo'

Tabella 5.4.1: Caratteristiche del treno Suburbano

La composizione adottata prevede 5 elettromotrici. La caratteristica meccanica di questo treno è la seguente.

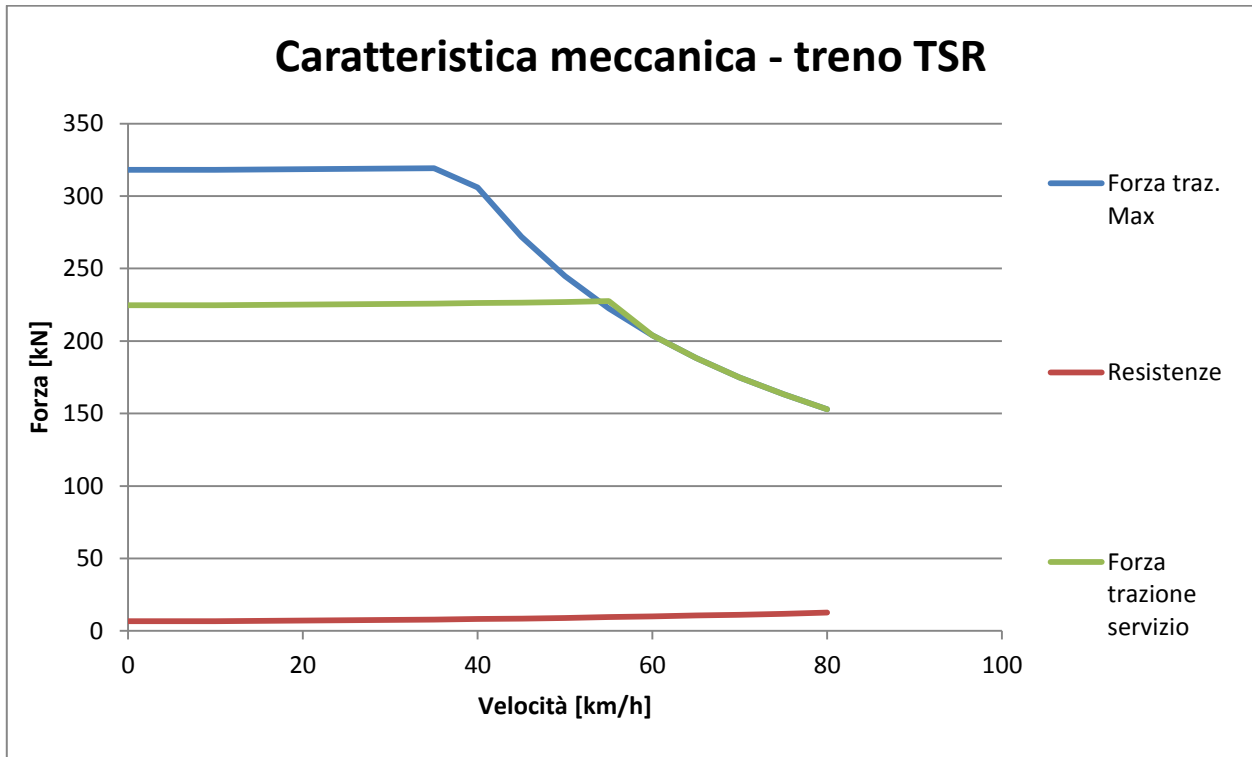


Grafico 5.4.1: Caratteristica meccanica del treno Suburbano

5.4.2 Treno Eurocity

Per il servizio Eurocity è stato scelto l'elettrotreno del tipo ETR 610 della Alstom. I suoi dati sono di seguito riassunti.

TRENO EUROCITY	
Tipo	Elettrotreno ETR 610
Lunghezza	187.4 m
Massa a vuoto	408 t
Massa in esercizio	450 t
Potenza massima continua	5'520 kW
Rodiggio elettromotrici	(1A)'(A1)'
Rodiggio rimorchiate	2'2'

Tabella 5.4.2: Caratteristiche del treno Eurocity

La composizione adottata prevede 4 elettromotrici e 3 rimorchiate. La caratteristica meccanica di questo treno è il seguente.

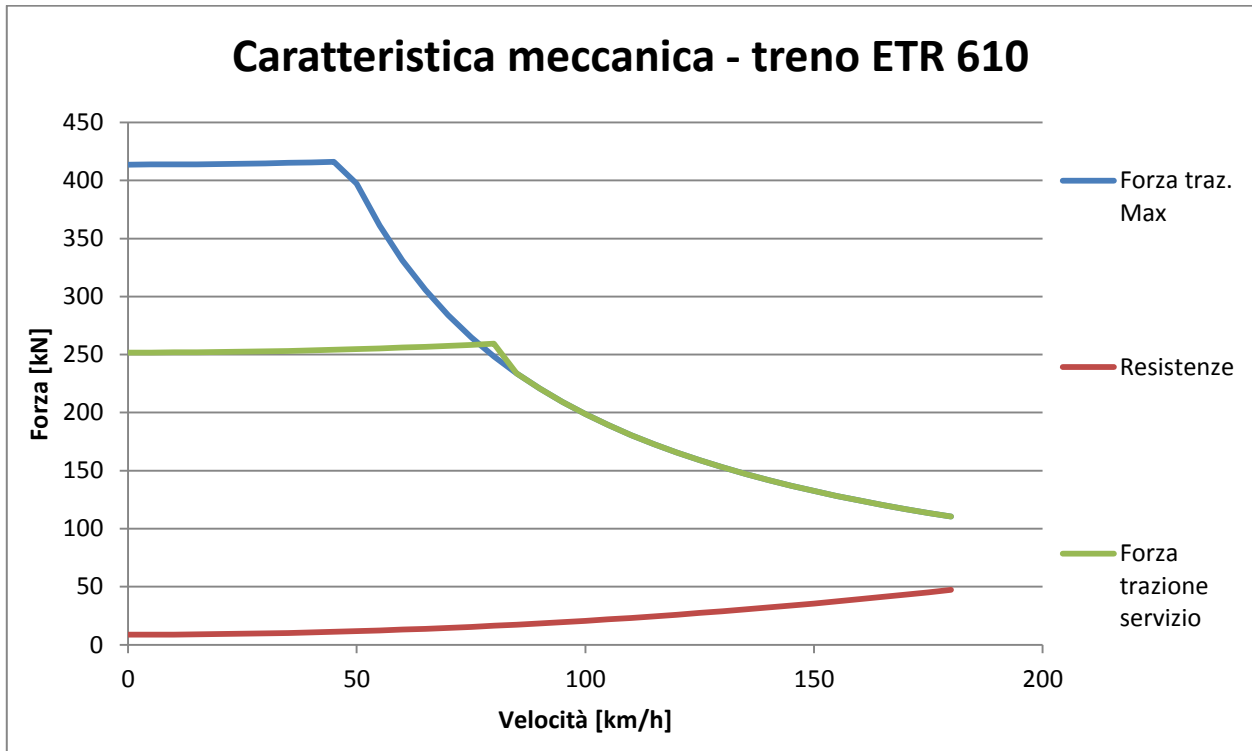


Grafico 5.4.2: Caratteristica meccanica del treno Eurocity

5.4.3 Treno Alta Velocità

Come treno ad alta velocità è stato scelto l'elettrotreno tipo ETR 500 della AnsaldoBreda, i cui dati sono qui riassunti.

TRENO ALTA VELOCITA'	
Tipo	Elettrotreno ETR 500
Lunghezza	327.6 m
Massa a vuoto	576 t
Massa in esercizio	647.5 t
Potenza massima continua	8'800 kW
Rodiggio locomotori	Bo'Bo'
Rodiggio rimorchiate	2'2'

Tabella 5.4.3: Caratteristiche treno AV

La composizione adottata prevede 2 locomotori e 11 rimorchiate. La caratteristica meccanica di questo treno è il seguente.

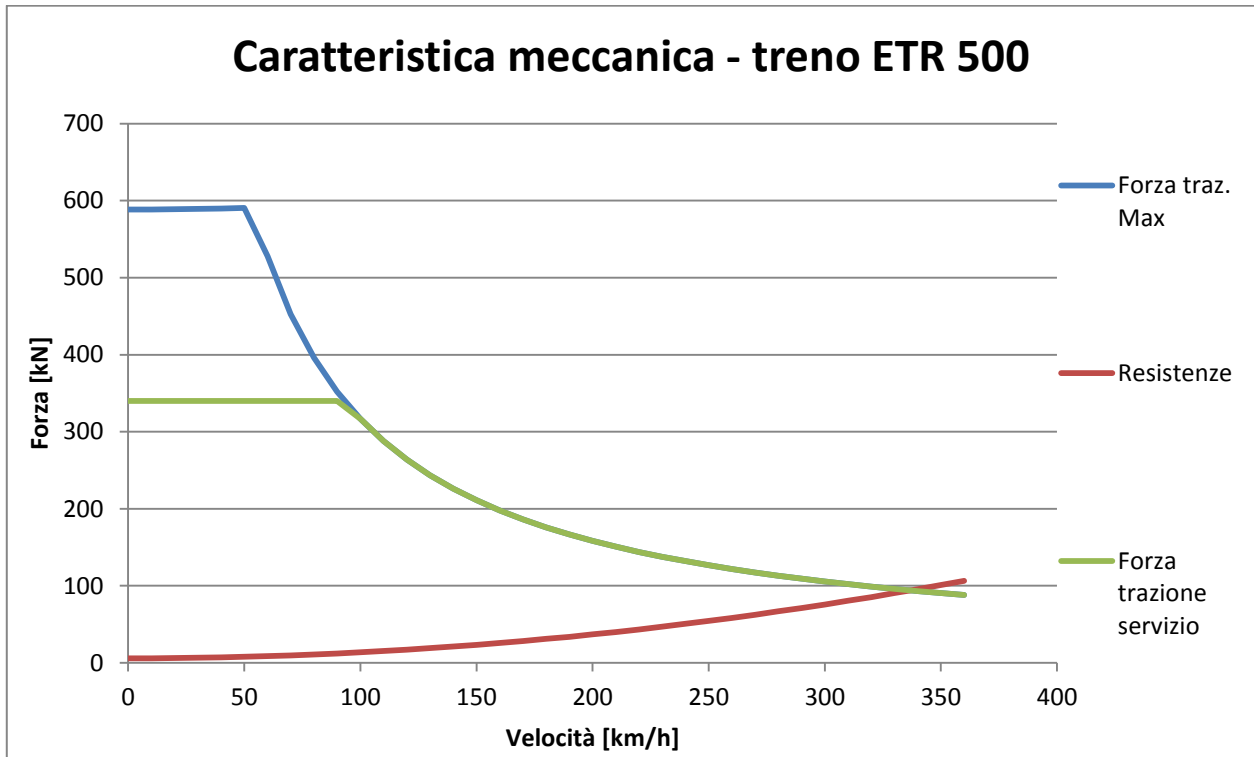


Grafico 5.4.3: Caratteristica meccanica del treno AV

6 SOFTWARE

Le analisi che verranno presentate all'interno dell'elaborato si avvalgono di un software di calcolo progettato dagli autori, che permette di analizzare la capacità delle linee e la propagazione dei ritardi. Il programma è stato realizzato mediante l'applicazione di produzione e gestione dei fogli elettronici *Microsoft Excel*, implementata grazie a codici di calcolo realizzati tramite il linguaggio di programmazione *Visual Basic for Application (V.B.A.)*.

La modellizzazione dei diagrammi di trazione è eseguita tramite una procedura comune a tutti i casi studiati, mentre lo studio della capacità e della propagazione dei ritardi si avvale di sottoprogrammi che si differenziano per:

- tipo di linea studiata (verranno prese in considerazione tre diverse tipologie di linea);
- tipo di distanziamento (Blocco Fisso oppure Blocco Mobile);
- tipo di analisi (capacità oppure propagazione dei ritardi).

6.1 Modellizzazione del diagramma di trazione

Di seguito si elencano i dati di input necessari per la costruzione del diagramma di trazione del treno considerato:

- massa in servizio m ;
- lunghezza del treno L ;
- resistenza specifica al rotolamento r ;
- potenza massima continuata P ;
- accelerazione di servizio a ;
- decelerazione di servizio d ;
- coeff. di aderenza ruota/rotaia f_{ax} ;
- peso aderente P_a .

Innanzitutto è necessario calcolare la resistenza totale, la forza di trazione e la forza accelerante.

Come **resistenza al moto**, poiché verranno studiate linee ideali piane e rettilinee, si considera soltanto la resistenza aerodinamica, al rotolamento ed all'attrito perno/cuscinetto che sono esprimibili secondo RFI [16] nelle seguenti formule:

- per linee tradizionali: $R = \left(r + 2,65 \cdot \left(\frac{V}{100} \right)^2 \right) \cdot m \cdot g$
- per linee AV: $R = (r + 0,00012 \cdot V^2) \cdot m \cdot g$

dove V è la velocità del convoglio in km/h.

La **forza di trazione** si calcola con la seguente formula fintanto che la potenza richiesta è minore di quella continuata:

$$F_t = R + m \cdot a \quad \text{per} \quad F_t < P/v$$

con v la velocità in m/s. Per velocità superiori a quella per la quale si raggiunge il limite di potenza continuata, la formula diventa la seguente:

$$F_t = P/v$$

Ad ogni modo, la forza di trazione non può eccedere il limite di aderenza F_{ax} , calcolato come:

$$F_{ax} = f_{ax} \cdot P_a$$

Infine si calcola la **forza accelerante** come differenza tra forza di trazione e resistenza al moto:

$$F_a = F_t - R$$

Le tre forze presentate permettono di costruire la caratteristica meccanica e quindi il diagramma di trazione corrispondente. Tale diagramma, teoricamente definito in continuo, viene modellizzato ad intervalli discreti di velocità, presi pari a 3 km/h eccetto il caso dell'AV, dove sono stati presi step di 5 km/h.

Tramite il diagramma di trazione è possibile costruire la traccia discretizzata del treno, in particolare si ricavano lo spazio percorso e il tempo trascorso nel passaggio tra una velocità e l'altra nella fase di accelerazione. I parametri necessari sono i seguenti:

- accelerazione: $a(\Delta V) = F_a(\Delta V)/m$

- tempo trascorso: $\Delta t(\Delta V) = \Delta V/a(\Delta V)$
- spazio percorso: $\Delta s(\Delta V) = (V_i + V_{i+1})/2 \cdot \Delta t(\Delta V)$

In frenatura si è assunto un valore di decelerazione costante pari a d ed i Δt e Δs si calcolano come in precedenza.

6.2 Modellizzazione della traccia imperturbata

L'algoritmo seguente consente di determinare la traccia del treno fino alla stazione successiva in cui deve effettuare la fermata, a partire dai dati di tempo, spazio e velocità iniziali.

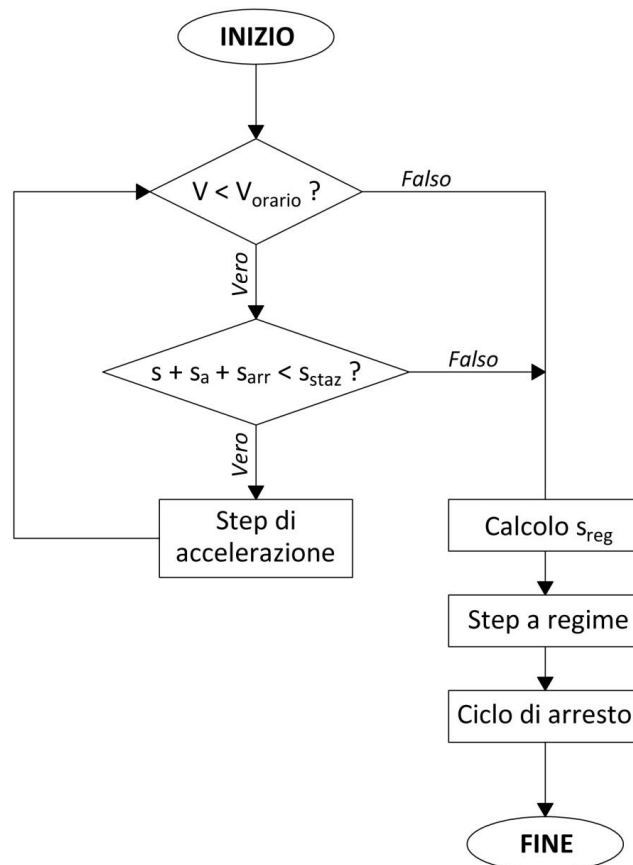


Figura 6.2.1: Traccia imperturbata - diagramma di flusso

Legenda:

- V è la velocità del treno nello step considerato;
- V_{orario} è la velocità d'orario;
- s è la progressiva a cui si trova la testa del treno nello step considerato;

- S_a è lo spazio necessario a compiere lo step di accelerazione;
- S_{arr} è lo spazio necessario a compiere la frenatura per l'arresto alla velocità corrente;
- S_{staz} è la progressiva spaziale che identifica la fine della banchina;
- S_{reg} è lo spazio a regime.

Tuttavia, per i motivi che verranno esposti nel paragrafo 7.2.1, nel caso della linea AV e Blocco Fisso si utilizzerà il seguente algoritmo.

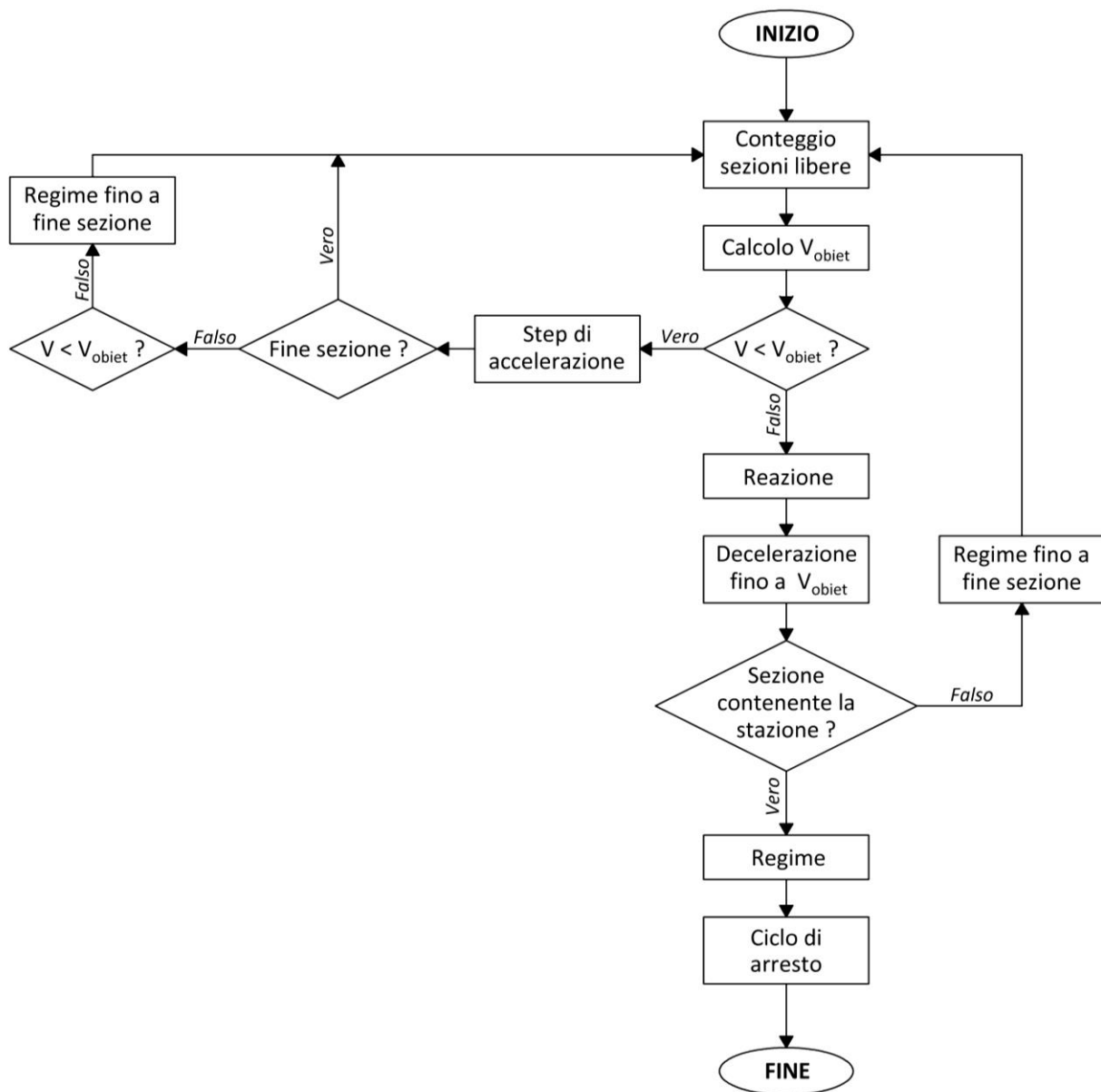


Figura 6.2.2: Traccia imperturbata linee AV - diagramma di flusso

Legenda:

- V_{obiet} è la velocità obiettivo (e viene calcolata per tracce imperturbate come la massima velocità del treno consentita nella sezione di blocco).

I risultati così ottenuti vengono immagazzinati in una matrice il cui numero di righe è uguale al numero di step calcolati mentre le colonne sono: velocità, tempo, spazio e velocità obiettivo (se prevista).

6.3 Modellizzazione dell'occupazione dell'infrastruttura

Nel distanziamento a Blocco Fisso, per occupazione di infrastruttura del singolo treno si intende il tempo di occupazione della singola sezione di blocco (come descritto nel paragrafo 3.4.4) mentre nel distanziamento a Blocco Mobile è lo spazio che deve essere libero davanti al treno. Pertanto è stato necessario specializzare il codice di calcolo per questi due sistemi.

6.3.1 Blocco Fisso

Partendo dalle matrici rappresentanti la traccia, si calcolano tramite interpolazione i tempi di ingresso e uscita del treno dalle sezioni di blocco. Il tempo di fine blocco è pari al tempo di uscita della testa del treno a cui si aggiungono il tempo di liberazione e i tempi tecnici. Il tempo di liberazione (t_l) è stato calcolato secondo la seguente formula:

$$\begin{cases} t_l = L/v_u & \text{se } L/v_u < \bar{t} \\ t_l = \bar{t} & \text{se } L/v_u > \bar{t} \end{cases}$$

essendo v_u la velocità del treno quando la testa esce dalla sezione di blocco e $\bar{t} = \sqrt{2 \cdot \frac{L}{a}}$ il tempo necessario al treno che accelera da velocità nulla a percorrere uno spazio pari alla propria lunghezza.

Il calcolo del tempo di inizio blocco (t_i) delle k sezioni di blocco, ovvero l'inizio di occupazione delle sezioni, viene determinato mediante il seguente algoritmo.

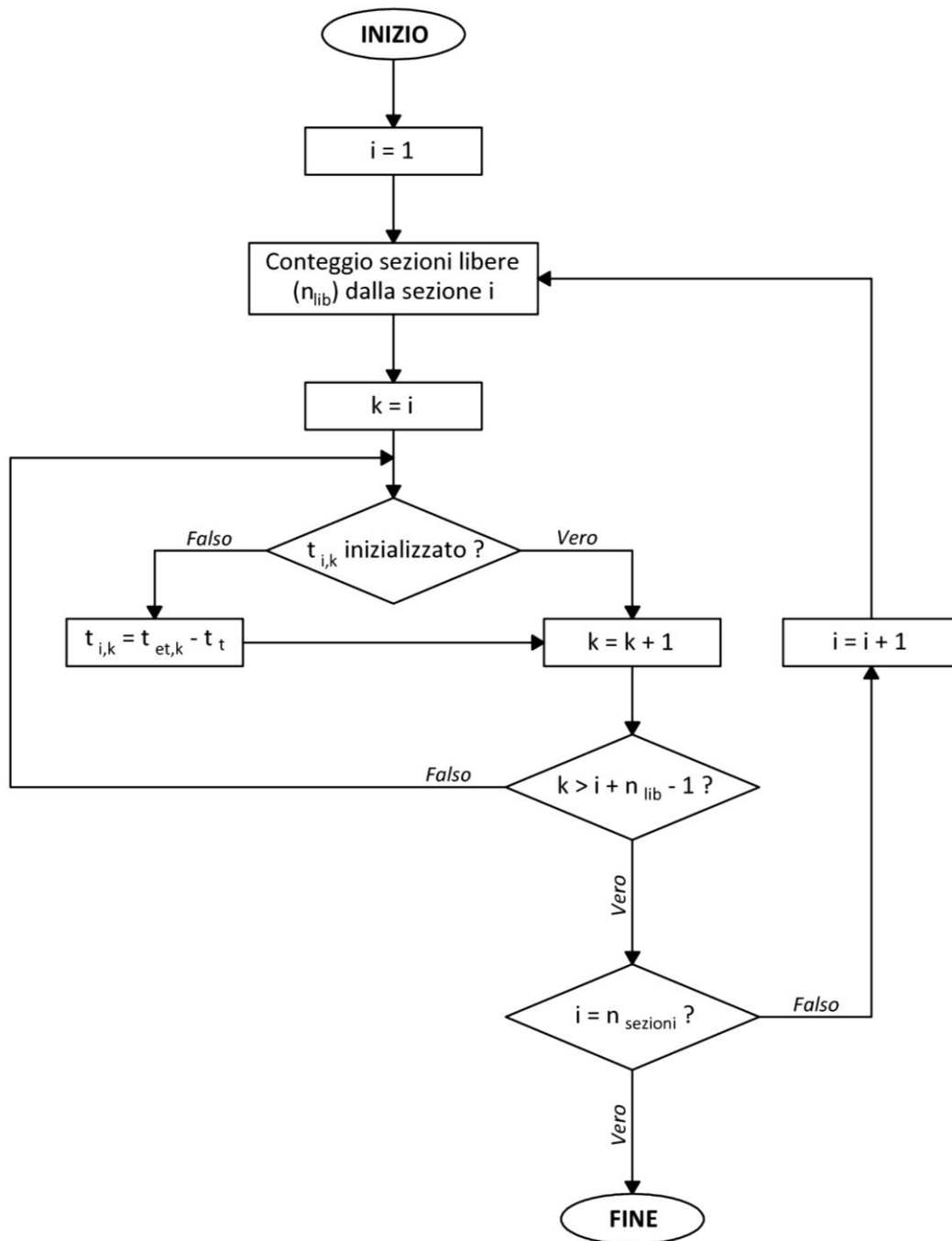


Figura 6.3.1: Tempo di inizio occupazione della sezione di blocco - diagramma di flusso

Legenda:

- $t_{et,k}$ è il tempo di entrata della testa del treno nella sezione k ;
- $n_{sezioni}$ è il numero di sezioni di blocco della linea;
- n_{lib} è il numero di sezioni libere associato ad una data velocità obiettivo.

Questo algoritmo è stato utilizzato nei casi di linee con sezioni concatenate. Nella linea suburbana, invece, il calcolo è stato eseguito basandosi sulla Figura 3.4.5: il tempo di inizio occupazione di una sezione di blocco si determina sottraendo i tempi tecnici ed il tempo di avvistamento al tempo di ingresso del treno nella sezione precedente. In questo modo è stato conteggiato il tempo di approccio (tempo di percorrenza della sezione precedente).

6.3.2 Blocco Mobile

Nel caso di distanziamento a Blocco Mobile il software elabora il distanziamento corrispondente ad ogni step definente la traccia. Pertanto essa è composta dalle seguenti quattro colonne: velocità, tempo, spazio e distanziamento (*dist*). L'espressione analitica di quest'ultimo è la seguente:

$$dist = d_a + t_t \cdot v + F + L_p$$

dove:

- d_a è lo spazio di arresto;
- t_t sono i tempi tecnici comprensivi del tempo necessario alla rilevazione della posizione del treno precedente, della trasmissione delle informazioni al treno seguente, dell'elaborazione delle informazioni e del tempo necessario per regolare la marcia;
- F è il franco di sicurezza;
- L_p è la lunghezza del treno precedente.

Per ogni punto spazio-temporale che definisce la traccia, a cui è inoltre associata la velocità del treno, corrisponde lo spazio antistante che deve essere libero affinché la marcia sia imperturbata.

6.4 Compattazione delle tracce

Con la modellizzazione delle tracce si ottiene la definizione spazio-temporale discreta dell'occupazione di infrastruttura di un qualsiasi treno. Seguendo il metodo di calcolo proposto dall'UIC CODE 406 [8], la capacità si calcola compattando le tracce dei treni previsti dall'orario. La procedura seguita dal software si differenzia nei due sistemi di distanziamento.

6.4.1 Blocco Fisso

L'algoritmo utilizzato per il distanziamento a Blocco Fisso traduce la procedura descritta nel paragrafo 3.4.3.2. Data una coppia di convogli (*w-esimo treno* e *w+1-esimo treno*), ne viene fatto coincidere l'istante di partenza e mediante i seguenti passaggi si ottiene il minimo distanziamento temporale necessario tra i due treni affinché il secondo proceda imperturbato.

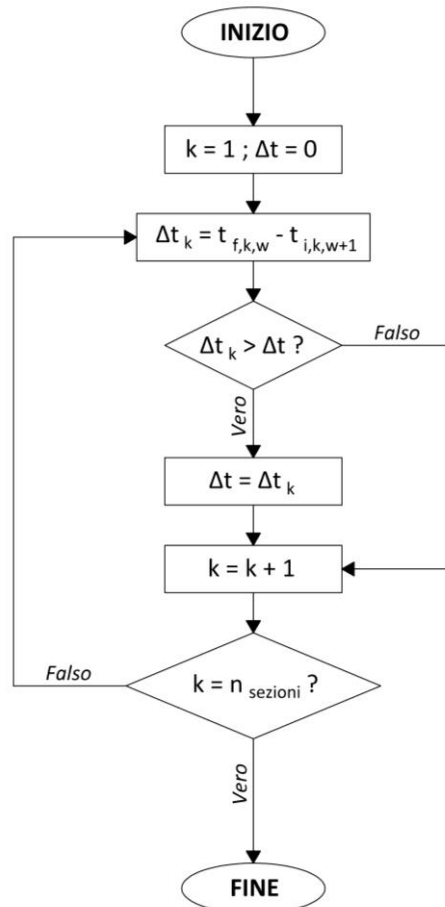


Figura 6.4.1: Intervallo minimo tra due treni - Blocco Fisso - diagramma di flusso

Legenda:

- k è il l'indice di scorrimento delle sezioni di blocco;
- w è il l'indice di scorrimento dei treni;
- Δt_k è una variabile in cui viene immagazzinata temporaneamente la differenza tra tempo di fine occupazione della *k-esima sezione* di blocco da parte del *w-esimo treno* e il tempo di fine occupazione della *k-esima sezione* di blocco da parte del *w+1-esimo treno*;

- Δt restituisce alla fine dell'esecuzione del codice il distanziamento temporale che deve avere il $w+1$ -esimo treno rispetto al w -esimo treno affinché la sua marcia sia imperturbata;
- $t_{i,k,w}$ è il tempo di inizio occupazione della k -esima sezione di blocco da parte del w -esimo treno;
- $t_{f,k,w}$ è il tempo di fine occupazione della k -esima sezione di blocco da parte del w -esimo treno.

Con l'algoritmo proposto, si inseriscono i treni previsti dall'orario, la procedura termina quando il tempo di occupazione di infrastruttura totale eccede il valore massimo ammesso, che dipende dal tipo di linea. Il diagramma di flusso che fornisce come risultati il massimo numero di treni (num. treni) e la loro occupazione di infrastruttura (T.O.I.) è il seguente.

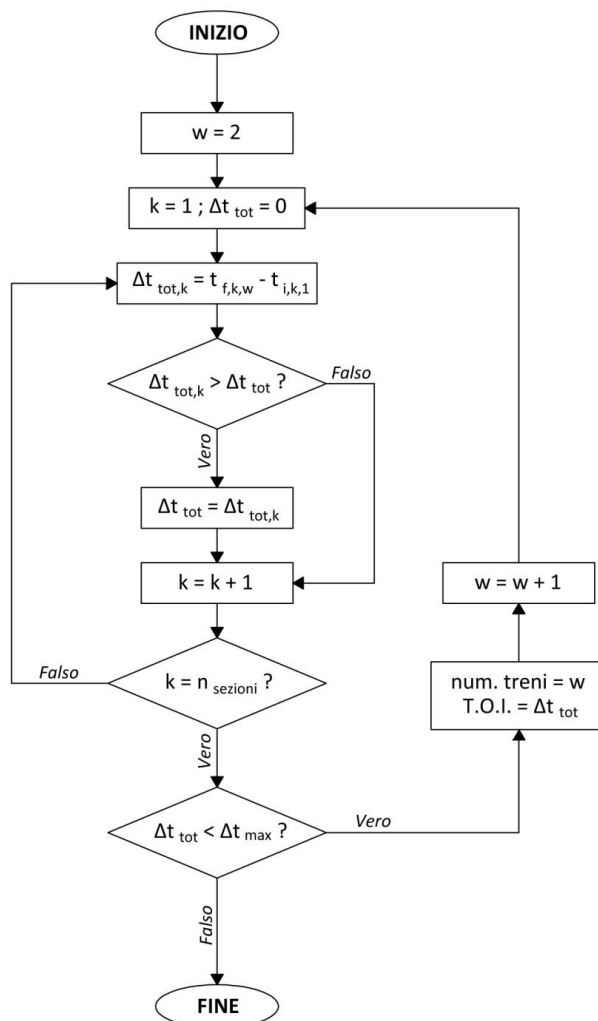


Figura 6.4.2: Massimo numero di treni e tempo di occupazione dell'infrastruttura - Blocco Fisso - diagramma di flusso

Legenda:

- k è il l'indice di scorrimento delle sezioni di blocco;
- w è il l'indice di scorrimento dei treni;
- Δt_{tot} è una variabile che immagazzina il T.O.I. dopo l'inserimento del w -esimo treno;
- $\Delta t_{tot,k}$ è una variabile che immagazzina il tempo di occupazione della k -esima sezione di blocco dopo l'inserimento del w -esimo treno;
- $t_{f,k,w}$ è il tempo di fine occupazione della k -esima sezione di blocco da parte del w -esimo treno;
- $t_{i,k,1}$ è il tempo di inizio occupazione della k -esima sezione di blocco da parte del 1° treno;
- Δt_{max} è il limite massimo stabilito per il T.O.I..

Il programma restituisce inoltre il tempo di occupazione di infrastruttura riferito alla compattazione di un numero di treni pari a quelli previsti dall'orario originale.

6.4.2 Blocco Mobile

L'algoritmo seguente individua per tentativi il corretto distanziamento temporale affinché le tracce del w -esimo e del $w+1$ -esimo treno non si influenzino vicendevolmente.

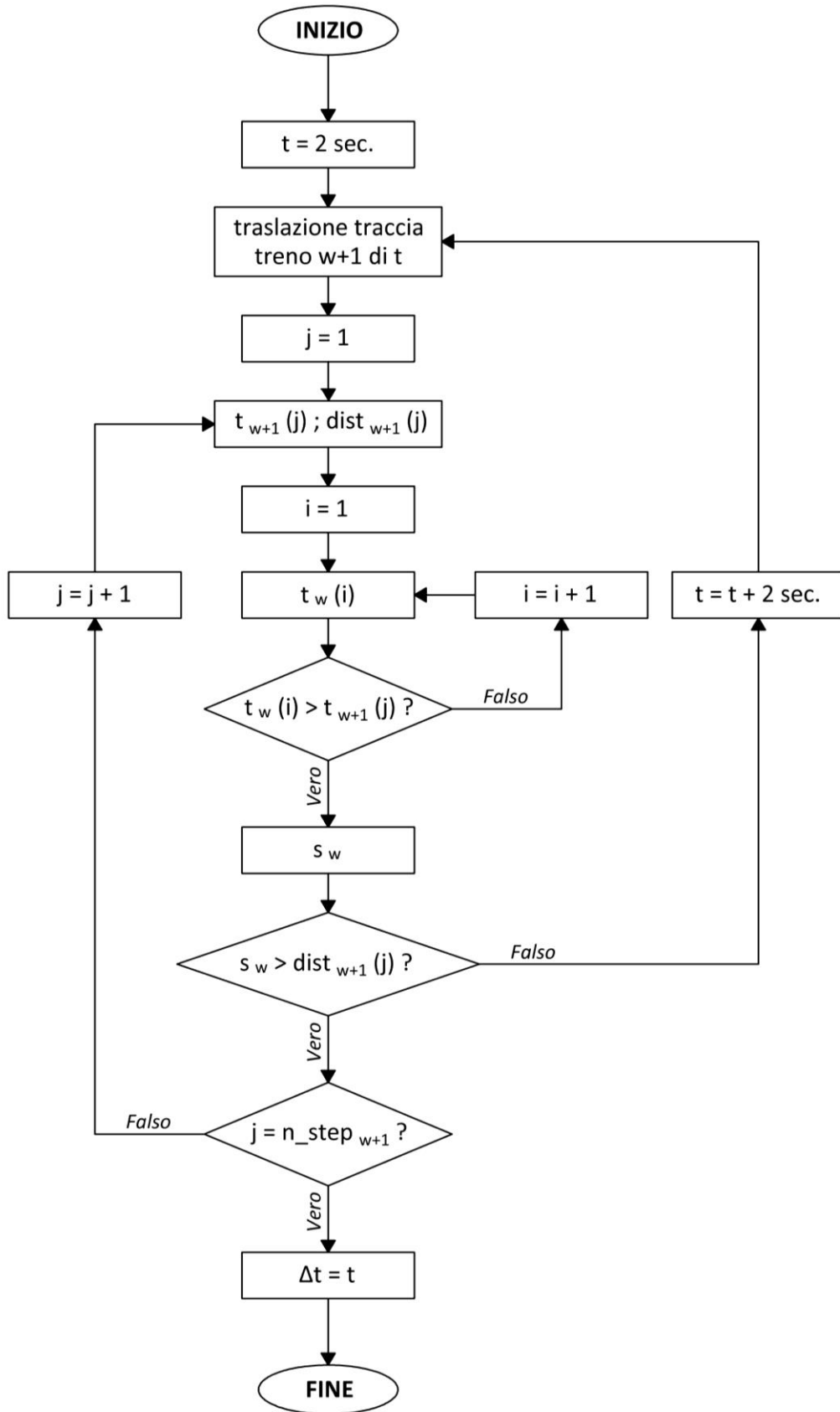


Figura 6.4.3: Intervallo minimo tra due treni - Blocco Mobile - diagramma di flusso

Legenda:

- t è il distanziamento temporale di tentativo tra il w -esimo treno e il $w+1$ -esimo treno;
- j è il l'indice di scorrimento degli step della traccia del $w+1$ -esimo treno;
- $t_{w+1}(j)$ è il tempo corrispondente al j -esimo step del $w+1$ -esimo treno;
- $dist_{w+1}(j)$ è la progressiva riferita al distanziamento nel j -esimo step del $w+1$ -esimo treno;
- i è il l'indice di scorrimento degli step della traccia del w -esimo treno;
- $t_w(i)$ è il tempo corrispondente all' i -esimo step del w -esimo treno;
- s_w è lo spazio (ottenuto per interpolazione) in cui si trova la testa del w -esimo treno al tempo $t_{w+1}(j)$;
- n_step_{w+1} è il numero di step da cui è costituita la traccia del $w+1$ -esimo treno;
- Δt è il distanziamento temporale che deve avere il $w+1$ -esimo treno rispetto al w -esimo treno affinché la sua marcia sia imperturbata.

L'errore nel calcolo dell'intervallo di distanziamento è inferiore o al massimo uguale a 2 secondi. Una volta stabilito il distanziamento temporale tra i treni presenti nell'orario, occorre eseguire la compattazione. L'algoritmo seguente individua il massimo numero di treni/ora (num. treni) e la loro occupazione di infrastruttura (T.O.I.).

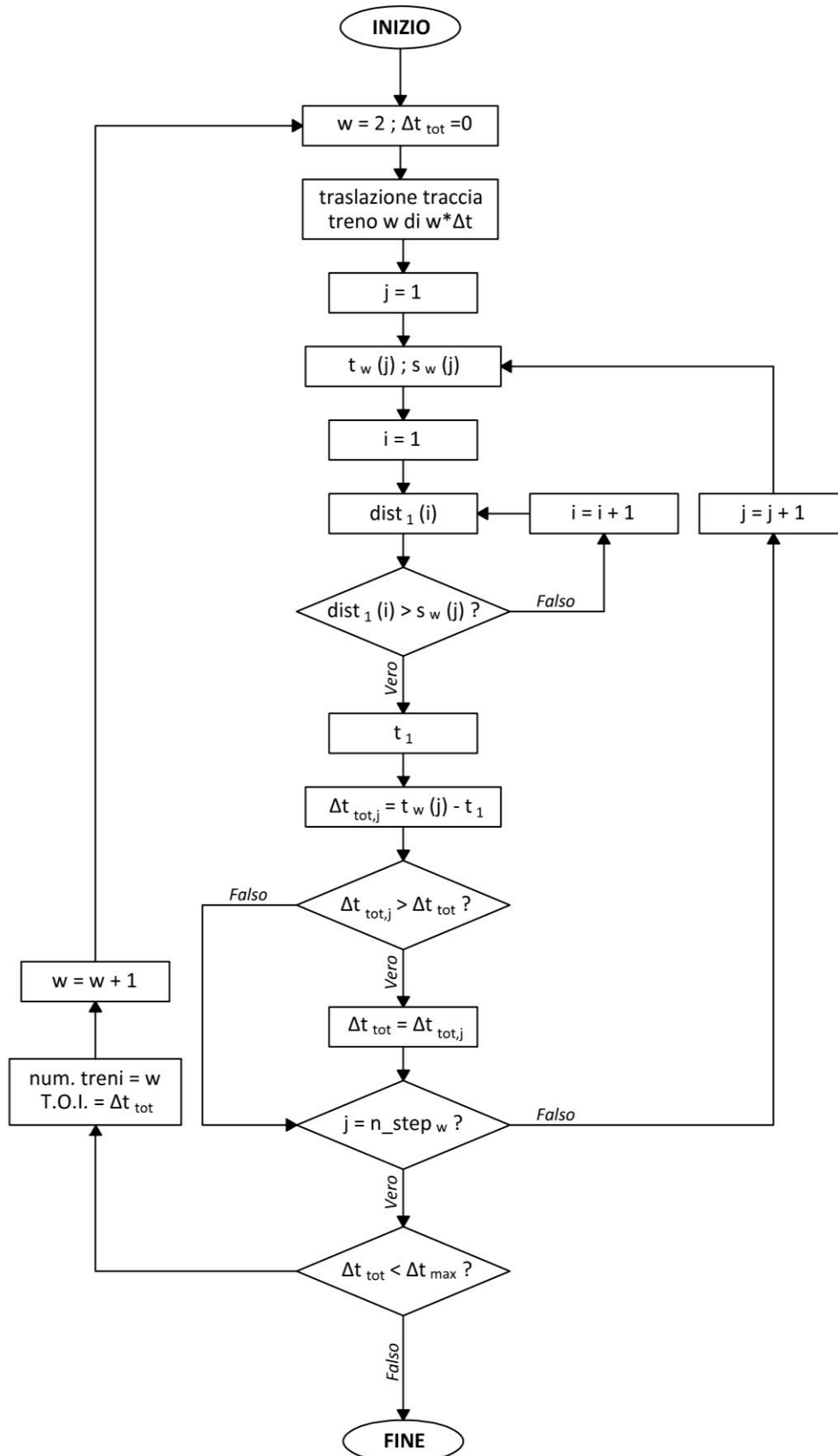


Figura 6.4.4: Massimo numero di treni e tempo di occupazione dell'infrastruttura - Blocco Mobile - diagramma di flusso

Legenda:

- w è l'indice di scorrimento dei treni dell'orario;
- Δt_{tot} è una variabile che immagazzina il T.O.I. dopo l'inserimento del w -esimo treno;
- j è il l'indice di scorrimento degli step della traccia del w -esimo treno;
- $t_w(j)$ è il tempo corrispondente al j -esimo step del w -esimo treno;
- $s_w(j)$ è la progressiva in cui si trova la testa del del w -esimo treno nel j -esimo step;
- i è il l'indice di scorrimento degli step della traccia del 1° treno;
- $dist_1(i)$ è la progressiva riferita al distanziamento nell' i -esimo step del 1° treno;
- t_1 è il tempo (ottenuto per interpolazione) in cui la progressiva del distanziamento del 1° treno è pari allo spazio $s_w(j)$;
- $\Delta t_{tot,j}$ è una variabile che immagazzina il tempo di occupazione alla progressiva $s_w(j)$ dopo l'inserimento del w -esimo treno;
- n_step_w è il numero di step da cui è costituita la traccia del w -esimo treno;
- Δt_{max} è il limite massimo stabilito per il T.O.I..

6.4.3 Calcolo degli altri risultati di capacità

Se si considera una finestra temporale di durata T , la percentuale di tempo di occupazione di infrastruttura si ottiene dal seguente rapporto:

$$\%T.O.I. = 100 \cdot \frac{T.O.I.}{T}$$

La percentuale di tempi di sicurezza ($\%T.S.$) è dedotta dalla massima percentuale di T.O.I. consigliata dall' U.I.C. ($\%T.O.I._{max}$):

$$\%T.S. = \frac{1 - \%T.O.I._{max}}{\%T.O.I._{max}} \cdot \%T.O.I.$$

La percentuale di capacità inutilizzata ($\%C.I.$) è la di parte rimanente di finestra temporale:

$$\%C.I. = 100 - \%T.O.I. - \%T.S.$$

Da queste percentuali si ottengono il tempo di sicurezza (T.S.) e il tempo di capacità inutilizzata (C.I.):

$$T.S. = \%T.S. \cdot T$$

$$C.I. = \%C.I. \cdot T$$

6.5 Modellizzazione della propagazione dei ritardi

Mediante un algoritmo molto simile a quello di Figura 6.2.1 o di Figura 6.2.2, è possibile generare la traccia di un treno affetto da ritardo primario. Si inserisce una decelerazione che porta all'arresto alla progressiva stabilita; la ripartenza avviene dopo un intervallo di tempo a scelta. Per dedurre l'occupazione, si utilizzano gli stessi algoritmi utilizzati precedentemente (introdotti al paragrafo 6.3). Dopodiché si decidono i tempi di entrata in linea dei treni successivi secondo l'orario e, infine, si calcola la traccia del generico *w-esimo treno*.

6.5.1 Blocco Fisso

L'algoritmo per definire la traccia del generico *w-esimo treno* nel caso di sistema di distanziamento a blocco Fisso è il seguente.

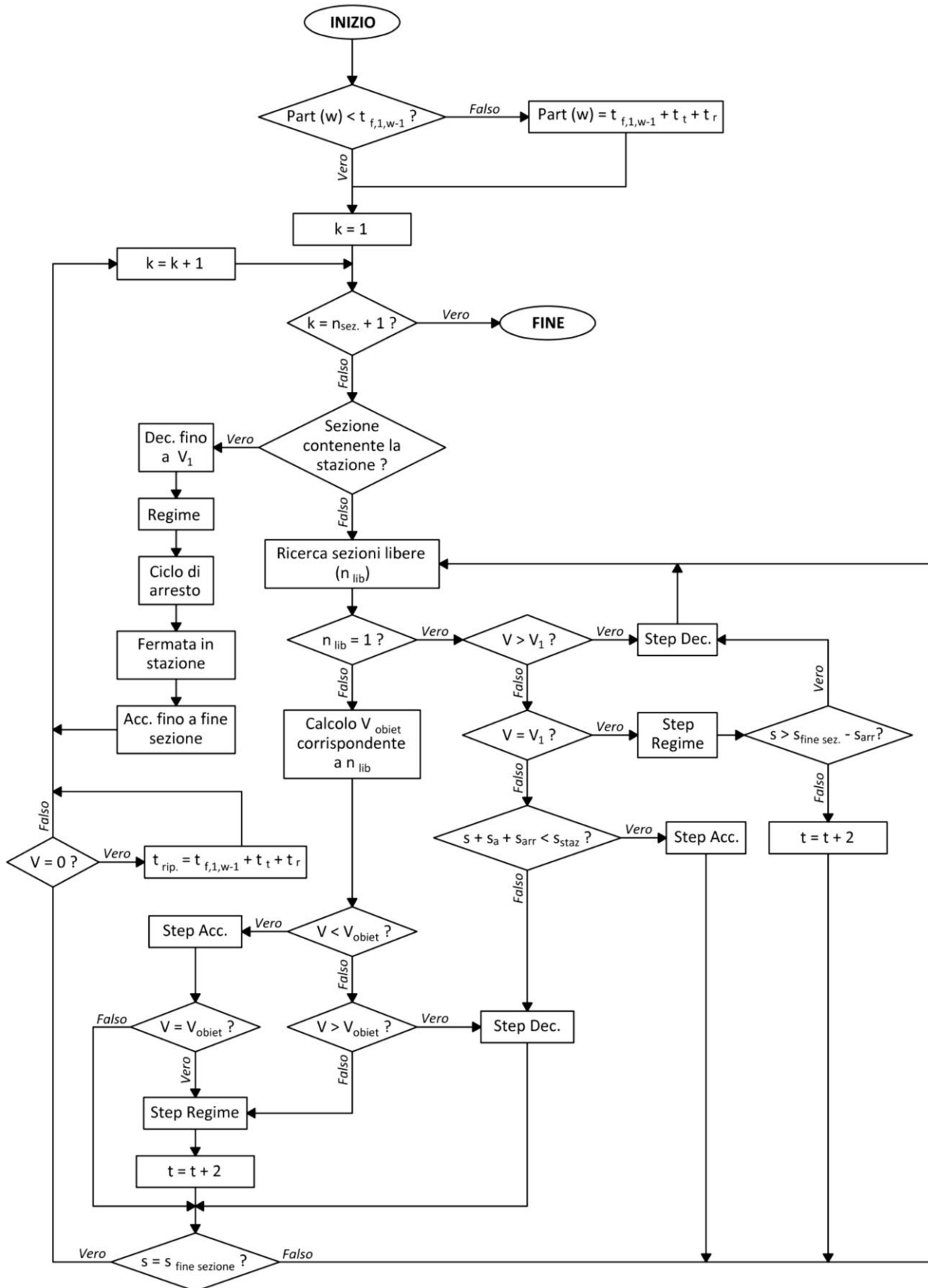


Figura 6.5.1: Traccia treno generico con possibile perturbazione della marcia - Blocco Fisso - diagramma di flusso

Legenda:

- $Part(w)$ è il tempo di entrata in linea prevista dall'orario di servizio per il w -esimo treno;
- $t_{f,k,w}$ è il tempo di fine occupazione della k -esima sezione di blocco da parte del w -esimo treno;
- t_t è i tempi tecnici;
- t_r è il tempo di reazione;
- k è il l'indice di scorrimento delle sezioni di blocco;
- n_{sez} è il numero totale di sezioni di blocco della linea;
- n_{lib} è il numero di sezioni libere antistanti (inclusa quella in cui si trova il treno);
- V_1 è il limite di velocità associato ad una sezione libera;
- V_{obiet} è il limite di velocità corrispondente al numero di sezioni libere disponibili;
- S_a è lo spazio percorso con lo step di accelerazione corrente;
- S_{arr} è lo spazio di arresto a partire dalla velocità corrente;
- S_{staz} è la progressiva a cui si trova la successiva stazione in cui il treno ferma;
- $S_{fine\ sez.}$ è la progressiva in cui termina la sezione di blocco corrente.

In questo modo è possibile definire la traccia di un generico treno, che potrebbe essere eventualmente perturbato dalla traccia del convoglio precedente.

6.5.2 Blocco Mobile

Nel caso di distanziamento a Blocco Mobile, l'algoritmo si basa sul seguente diagramma di flusso.

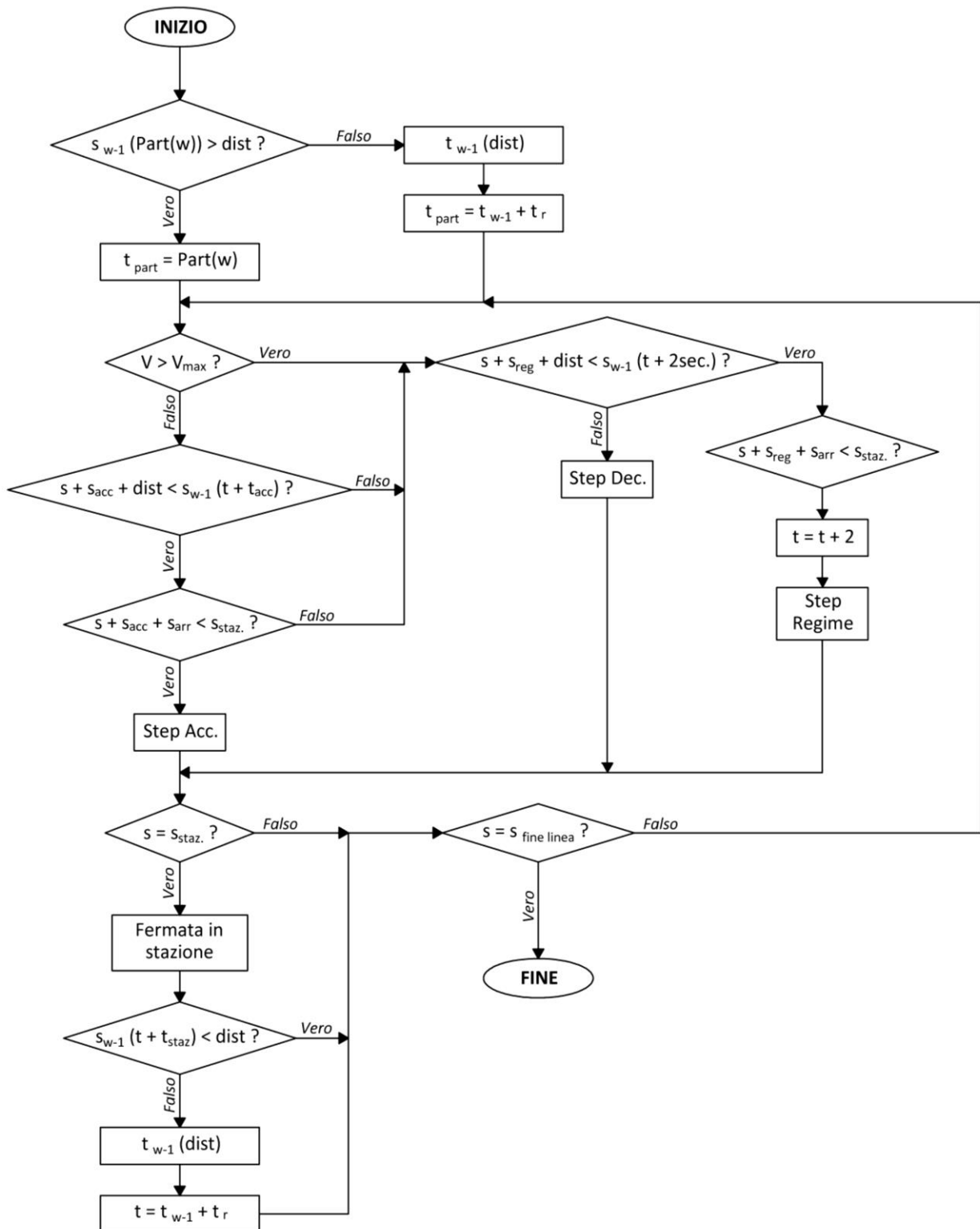


Figura 6.5.2: Traccia treno generico con possibile perturbazione della marcia - Blocco Mobile - diagramma di flusso

Legenda:

- $s_{w-1}(t)$ è la progressiva in cui si trova la testa del $w-1$ -esimo treno al tempo t ;

- $\text{Part}(w)$ è il tempo di entrata in linea prevista per il w -esimo treno nell'orario di servizio;
- dist è la progressiva riferita al distanziamento del treno in esame;
- $t_{w-1}(s)$ è il tempo al quale la testa del $w-1$ -esimo treno transita alla progressiva s ;
- t_{part} è il tempo in cui il treno in esame entra in linea;
- t_r è il tempo di reazione;
- V_{max} è la velocità d'orario del treno in esame;
- S_{reg} è lo spazio percorso a regime (in un tempo pari a 2 secondi);
- S_{arr} è lo spazio di arresto del treno in esame;
- S_{acc} è lo spazio percorso nello step di accelerazione;
- S_{staz} è la progressiva a cui si trova la successiva stazione in cui il treno ferma;
- t_{acc} è il tempo trascorso nello step di accelerazione;
- t_{sosta} è il tempo di sosta in stazione secondo l'orario di servizio;
- $S_{\text{fine linea}}$ è la progressiva terminale della linea.

In questo algoritmo vi è la necessità di calcolare, dato un tempo, la progressiva alla quale si trova un treno in quel tempo, o viceversa, dato uno spazio, il tempo in cui un treno transita a quella progressiva. Queste sottofunzioni vengono affrontate mediante i due seguenti algoritmi.

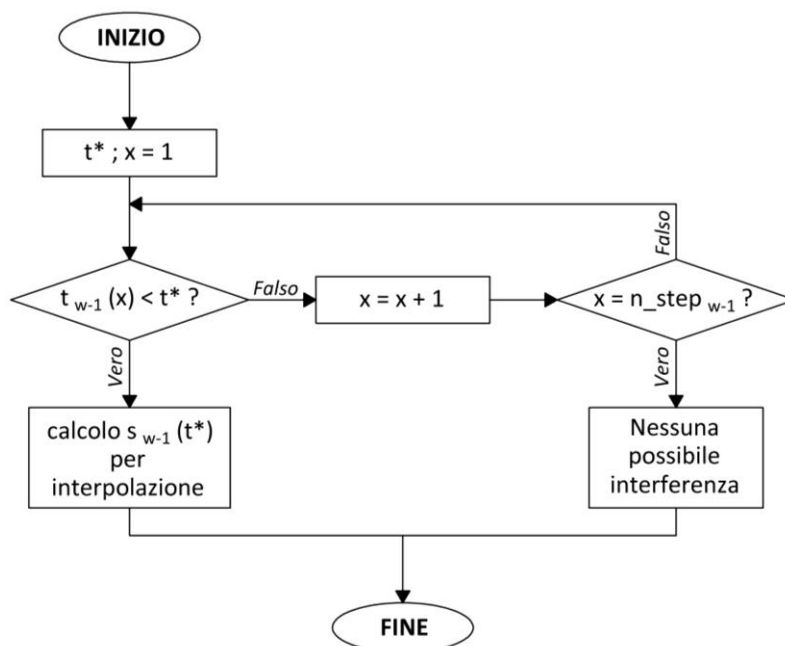


Figura 6.5.3: Progressiva a cui si trova il treno in un dato tempo

Legenda:

- x è l'indice di scorrimento degli step del $w-1$ -esimo treno;
- $t_{w-1}(x)$ è il tempo del $w-1$ -esimo treno nell' x -esimo step;
- t^* è il tempo nel quale si vuole determinare a che progressiva si trova il $w-1$ -esimo treno;
- $s_{w-1}(t^*)$ è la progressiva in cui si trova il $w-1$ -esimo treno al tempo t^* ;
- n_step_{w-1} è il numero totale di step del $w-1$ -esimo treno.

Il codice è impostato in modo tale da calcolare per interpolazione lineare $s_{w-1}(t^*)$ a partire dai valori di spazio e tempo dello step precedente e successivo al tempo t^* .

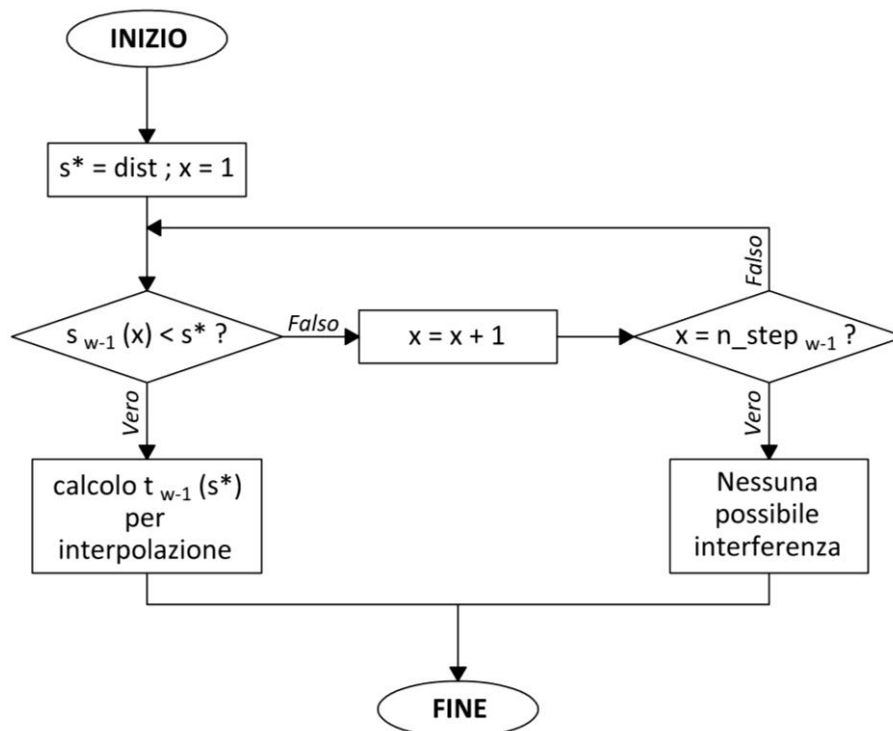


Figura 6.5.4: Tempo in cui il treno si trova ad una data progressiva

Legenda:

- $s_{w-1}(x)$ è la progressiva a cui si trova il $w-1$ -esimo treno nell' x -esimo step;
- s^* è la progressiva alla quale si vuole trovare il tempo in cui il $w-1$ -esimo treno vi transita;
- $t_{w-1}(s^*)$ è il tempo in cui il $w-1$ -esimo treno transita alla progressiva s^* .

Il codice è impostato in modo tale da calcolare per interpolazione lineare $t_{w-1}(s^*)$ a partire dai valori di spazio e tempo dello step precedente e successivo alla progressiva s^* .

6.5.3 Calcolo degli altri risultati della propagazione dei ritardi

Applicando gli algoritmi di Figura 6.5.1 e di Figura 6.5.2 ai treni dell'orario, è possibile simulare la situazione che si genera in linea a seguito dell'inserimento di un ritardo ad un dato treno. Si ricavano infatti le tracce dei treni ed i ritardi con cui arrivano ed escono dalla linea, da questi ultimi si ottiene il numero di treni coinvolti. Applicando un algoritmo analogo a quello che individua l'occupazione di infrastruttura (Figura 6.4.2 e Figura 6.4.4), si ricava il tempo di durata della perturbazione.

7 STUDIO DELLA CAPACITÀ DI SCENARI IDEALI

Sono state considerate tre differenti tipologie di linee ferroviarie con caratteristiche ideali, al fine di giungere ad alcune conclusioni di prima approssimazione che abbiano validità generale. Queste linee ideali rappresentano infrastrutture ferroviarie rettilinee ed in piano, in condizioni ordinarie di esercizio.

Tale capitolo è strutturato come segue:

- si descrivono inizialmente le caratteristiche principali dell'infrastruttura;
- si descrive poi brevemente l'orario grafico attuale;
- si descrive lo stato attuale di utilizzazione dell'infrastruttura in termini di capacità, seguendo le linee guida dettate dall'UIC CODE 406;
- l'analisi continua considerando le due principali filosofie di distanziamento:
 - Blocco Fisso
 - Si considera inizialmente uno scenario di base e si procede quindi alla saturazione dell'infrastruttura al fine di valutarne l'eventuale porzione di capacità inutilizzata;
 - Si considerano successivamente una serie di parametri. Essi vengono fatti variare rispetto al caso di base, uno alla volta, tenendo fissi gli altri e, come in precedenza, si procede ad un'analisi di capacità al variare del parametro di volta in volta considerato.
 - Blocco Mobile
 - Come per il Blocco Fisso si comincia considerando una situazione di base;
 - In seguito vengono scelti dei parametri che a turno sono fatti variare per osservare la loro incidenza sulla capacità.
- alla fine di ogni paragrafo si confrontano le due tecniche di distanziamento e si eseguono delle prove di variazione multipla dei parametri in modo da osservare in quali situazioni i due sistemi di distanziamento potrebbero equivalersi.

7.1 Linea Suburbana

E' stata considerata come linea suburbana di riferimento la seguente linea ideale, le cui caratteristiche sono esposte nella tabella sottostante.

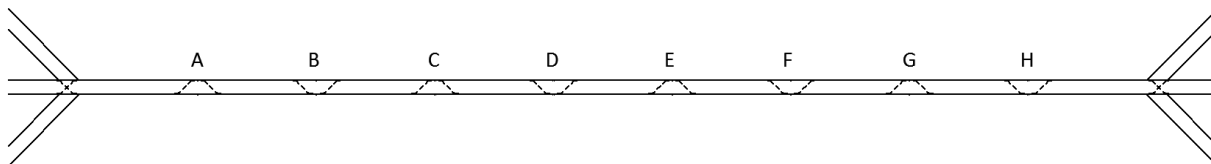


Figura 7.1.1: Schematizzazione della linea Suburbana

Velocità di tracciato	60 km/h
Velocità d'orario	57 km/h
Lunghezza totale della sezione di linea	9,9 km
Lunghezza delle sezioni di blocco	450 m
Lunghezza delle fermate	200 m
Distanza tra due fermate	1'350 m
Distanza tra due stazioni	No stazioni intermedie
Tipologie di treni circolanti	TSR
Tempo di fermata	60 s

Tabella 7.1.1: Caratteristiche della linea Suburbana

Per questo scenario è stata scelta una finestra temporale di un'ora. Tale scelta, apparentemente in disaccordo con i principi esposti nell'UIC CODE 406¹, è giustificata dal fatto che il tratto di linea considerato ha un'estensione limitata ed è percorsa dalla stessa tipologia di treni che effettuano le medesime fermate.

Si sono scelte sezioni di blocco di lunghezza inferiore alla tradizionale di 1'350 m in modo da ottimizzarle rispetto alla bassa velocità di tracciato. Questa scelta prende spunto dal caso reale del Passante di Milano dove appunto le sezioni di blocco hanno lunghezza media di 450 m.

Nell'orario di base sono stati previsti 10 treni/ora, con un conseguente distanziamento di 6 minuti. I treni effettuano tutte le fermate ed essendo tutti dello stesso tipo, seguono la medesima

¹ L'UIC CODE 406 consiglia di applicare la compressione all'orario di un giorno rappresentativo (un giorno lavorativo) in un periodo di picco di almeno due ore.

curva di accelerazione e di frenatura. Il tempo di percorrenza tra due fermate è pertanto sempre lo stesso.

7.1.1 Blocco Fisso

Questo tipo di segnalamento può essere rappresentativo di una linea ferroviaria che abbia come dotazione minima per il segnalamento il blocco elettrico automatico a correnti fisse.

I codici di calcolo utilizzati nel presente paragrafo si basano sugli algoritmi di Figura 6.2.1, Figura 6.3.1, Figura 6.4.1 e Figura 6.4.2.

7.1.1.1 Situazione attuale

Per svolgere uno studio approfondito della capacità della linea con il traffico previsto, è stato necessario definire il valore dei parametri utilizzati, sia riguardanti il materiale rotabile, sia il sistema di distanziamento, sia l'orario di servizio. Si ritiene che le scelte compiute rendano tali parametri rappresentativi delle reali reti suburbane del panorama italiano.

Di seguito si riporta la composizione dei tempi tecnici considerati nel caso di Blocco Fisso.

Tempo per la formazione dell'itinerario	4 s
Tempo per l'avvistamento del segnale	12 s
Tempo per il rilascio dell'itinerario	4 s
<i>Tempi tecnici totali</i>	20 s

Tabella 7.1.2: Tempi Tecnici – linea suburbana – Blocco Fisso

In questo caso il macchinista interverrà con la frenatura una volta attraversato fisicamente il segnale di prima categoria disposto a giallo in modo tale da arrestare il treno entro il successivo segnale disposto a via impedita. In particolare, in questo scenario di base, la marcia del treno può considerarsi indisturbata se il segnale di prima categoria si dispone a verde almeno 12 secondi¹ prima dell'attraversamento della testa del treno del segnale stesso.

Dall'analisi dell'orario grafico originale e procedendo con il processo di compressione, si è pervenuti ai seguenti risultati:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	28.3
--	------

¹ Si è deciso di assumere la distanza di visibilità pari a 200 m che le N.E.A.T. prescrivono nel caso di velocità di 90 km/h.

Tempo di sicurezza [min]	5.0
Capacità inutilizzata [min]	26.7
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	47.1%
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	8.3%
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	44.6%
Treni per ora	10
Velocità media delle tracce [km/h]	28
Consumo di capacità [%]	55.4 %
Stabilità	52.9 %
Eterogeneità	0.0 %

Tabella 7.1.3: Risultati della compressione dell'orario originale – linea suburbana – Blocco Fisso

Dall'analisi è stato ricavato innanzitutto il tempo di occupazione dell'infrastruttura (28.3 minuti). L'UIC, per linee suburbane nell'ora di picco, consiglia un tetto massimo di occupazione dell'infrastruttura pari all'85% della finestra temporale considerata e quindi un margine di tempo pari al 15%. Basandosi sulle indicazioni dell'UIC, si è deciso di mantenere, nelle nostre analisi, lo stesso rapporto tra tempo di occupazione e margini. Pertanto, essendo l'occupazione di infrastruttura pari in questo caso al 47.1% della finestra di tempo, si riservano margini pari all'8.3%; ne consegue che il 44.6% di tempo residuo consista in capacità inutilizzata. Di seguito verrà portato a termine il metodo di compattazione esposto nell'UIC CODE 406 inserendo nuovi treni fino a massima utilizzazione possibile della capacità inutilizzata.

Procedendo con la compressione dell'orario grafico si nota la possibilità di inserire ulteriori tracce orario. Arrivando alla saturazione dell'orario, si sono ottenuti i seguenti valori:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	50.9
Tempo di sicurezza [min]	9.0
Capacità inutilizzata [min]	0.1
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	84.8%
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	15.0%
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	0.2%
Treni per ora	18
Velocità media delle tracce [km/h]	28
Consumo di capacità [%]	99.8 %
Stabilità	15.2 %
Eterogeneità	0.0 %

Tabella 7.1.4: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea suburbana – Blocco Fisso

Dalla compressione dell'orario si nota com'è possibile aumentare il numero di treni/ora previsti dall'orario originale. In particolare potrebbero essere inseriti nell'orario 8 treni aggiuntivi, garantendo comunque i margini previsti dall'UIC.

Di seguito si analizzano i risultati di capacità al variare dei parametri considerati.

7.1.1.2 Tempi tecnici

Nello scenario attuale si ha un totale dei tempi tecnici di 20 s (somma dei tempi di avvistamento del segnale, formazione e rilascio itinerario). Il tempo di avvistamento non è propriamente un tempo tecnico ma in questa trattazione può essere considerato tale per i motivi esposti nel paragrafo 7.1.1.1.

Dal momento che le tecnologie utilizzate in ambito ferroviario permettono sia un utilizzo più cautelativo delle stesse, sia scenari più estremi data la probabile evoluzione tecnologica, l'ammontare dei tempi tecnici è stato fatto variare all'interno di un ampio range di valori, i cui estremi hanno più che altro una valenza teorica.

Eseguendo il metodo di compattazione per i diversi tempi tecnici considerati (mantenendo invariati gli altri parametri), si ottengono i seguenti risultati. Con la sigla **T/O** si indica in seguito il numero di treni/ora, con **T.O.I.** il tempo di occupazione dell'infrastruttura, con **T.S.** il tempo di sicurezza e con **C.I.** la capacità inutilizzata.

Tempi tecnici [s]	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>11</u>	<u>14</u>	<u>17</u>	<u>20</u>	<u>23</u>	<u>26</u>	<u>29</u>
T/O	20	19	19	19	19	18	18	18	17	17	17
T.O.I. [min]	50.5	48.6	49.3	49.9	50.9	49.1	50.0	50.9	48.9	49.8	50.6
T.S. [min]	8.9	8.6	8.7	8.8	9.0	8.7	8.8	9.0	8.6	8.8	8.9
C.I. [min]	0.5	2.8	2.0	1.3	0.2	2.2	1.2	0.1	2.5	1.5	0.5
% T.O.I. [%]	84.2%	81.1%	82.1%	83.2%	84.8%	81.8%	83.3%	84.8%	81.5%	82.9%	84.4%
% T.S. [%]	14.9%	14.3%	14.5%	14.7%	15.0%	14.4%	14.7%	15.0%	14.4%	14.6%	14.9%
% C.I. [%]	0.9%	4.6%	3.4%	2.1%	0.3%	3.7%	2.0%	0.2%	4.1%	2.4%	0.8%

Tabella 7.1.5: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea suburbana - Blocco Fisso

In questo grafico si rappresenta il legame tra i tempi tecnici ed il massimo numero di treni prevedibili nell'orario.

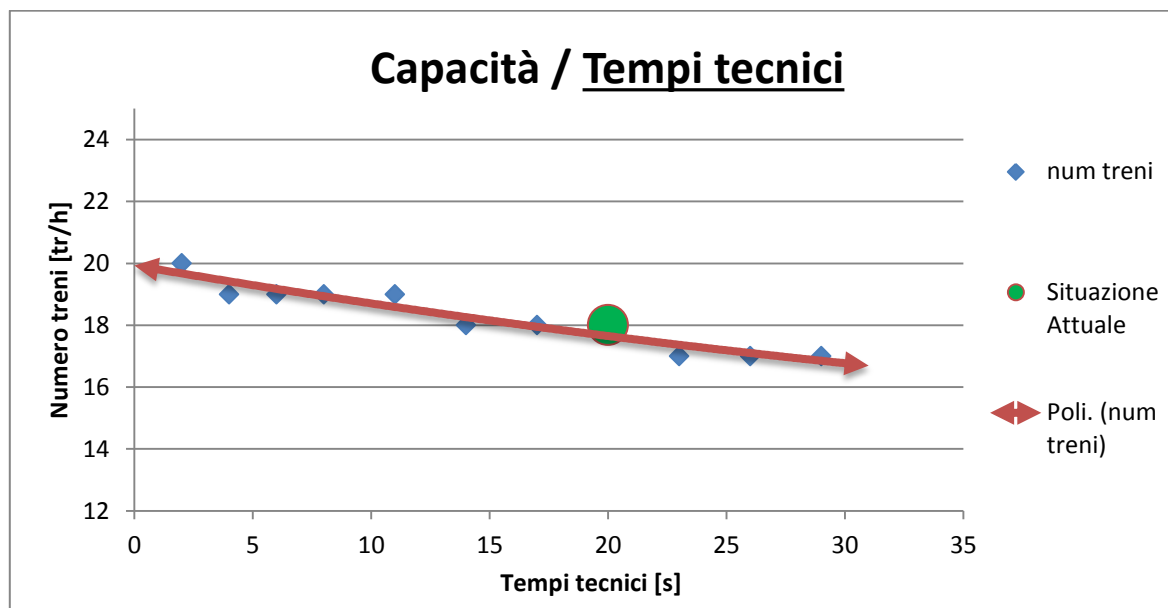


Grafico 7.1.1: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso

Come si poteva immaginare, all'aumentare dei tempi tecnici diminuisce la capacità della linea, poiché aumenta l'occupazione di infrastruttura del singolo treno.

Con tempi tecnici totali di 2 s si potrebbero prevedere fino a 20 treni/ora, mentre si scende a 17 treni/ora con tempi tecnici di 29 s. Questo parametro ha una discreta influenza sulla capacità, infatti bastano variazioni di pochi secondi nei tempi tecnici per variare la capacità della linea.

7.1.1.3 Accelerazione di servizio

Nello scenario attuale si è considerata un'accelerazione di servizio pari al 70% di quella massima, presa pari a 0.9 m/s^2 . Si è deciso di effettuare delle prove anche con valori maggiori del limite massimo considerato nel caso di base.

% di acc. di servizio	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%
Accelerazione di servizio [m/s ²]	<u>0.18</u>	<u>0.27</u>	<u>0.36</u>	<u>0.45</u>	<u>0.54</u>	<u>0.63</u>	<u>0.72</u>	<u>0.81</u>	<u>0.9</u>	<u>0.99</u>	<u>1.08</u>	<u>1.17</u>	<u>1.26</u>
T/O	15	16	17	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18
T.O.I. [min]	49.2	49.6	51.0	49.7	48.8	50.9	50.4	49.9	49.6	49.4	49.1	49.0	48.9
T.S. [min]	8.7	8.7	9.0	8.8	8.6	9.0	8.9	8.8	8.7	8.7	8.7	8.6	8.6
C.I. [min]	2.1	1.7	0.0	1.5	2.6	0.1	0.7	1.3	1.7	1.9	2.2	2.4	2.5
% T.O.I. [%]	82.1%	82.6%	84.9%	82.9%	81.3%	84.8%	83.9%	83.2%	82.6%	82.3%	81.8%	81.6%	81.5%
% T.S. [%]	14.5%	14.6%	15.0%	14.6%	14.4%	15.0%	14.8%	14.7%	14.6%	14.5%	14.4%	14.4%	14.4%

% C.I. [%]	3.4%	2.8%	0.1%	2.5%	4.3%	0.2%	1.2%	2.1%	2.8%	3.2%	3.7%	4.0%	4.1%
------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabella 7.1.6: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea suburbana - Blocco Fisso

Di seguito si può osservare il legame tra accelerazione e capacità intesa come numero massimo di treni circolanti.

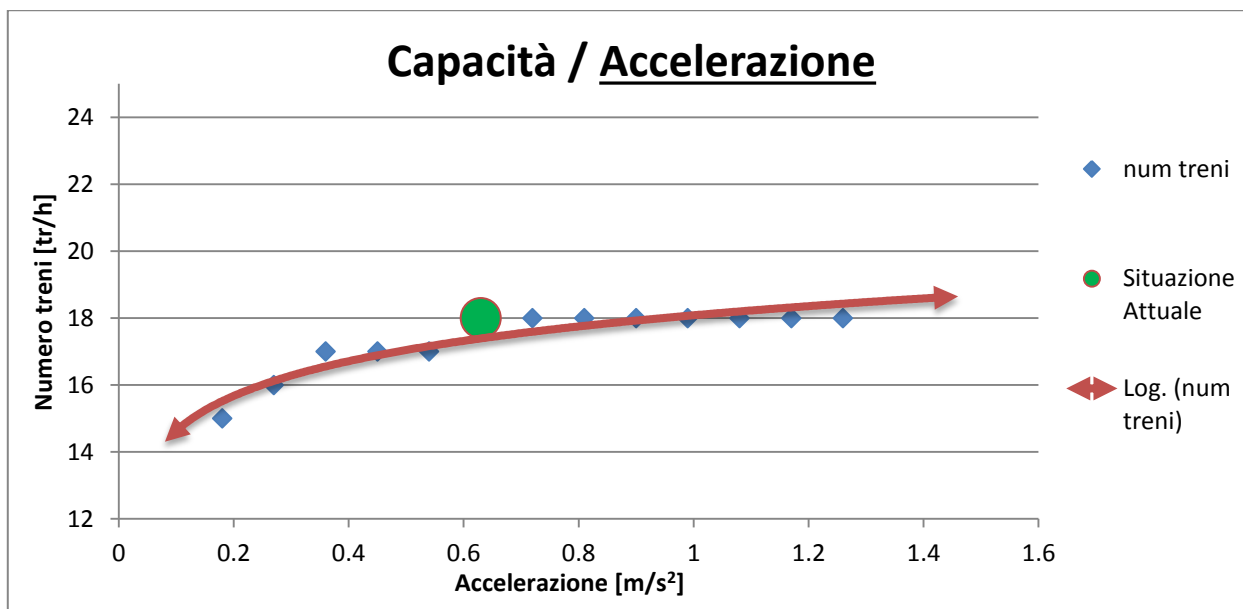


Grafico 7.1.2: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso

La capacità risulta crescente con l'accelerazione di servizio, tuttavia il legame non è lineare. Al diminuire dell'accelerazione si nota un'apprezzabile variazione di capacità, mentre all'aumentare rispetto alla situazione attuale non c'è un guadagno e il numero di treni tende a restare costante. Non si sono considerati valori maggiori di accelerazione in quanto, oltre il valore di 1.26 m/s², la Forza di Trazione supera quella di Aderenza ruota-rotaia.

Questo risultato è spiegabile con il fatto che il sistema di distanziamento a Blocco Fisso esprime una buona potenzialità quando la circolazione avviene alla velocità di regime (alla quale è stata in teoria ottimizzata la lunghezza delle sezioni di blocco). Per basse accelerazioni, il treno non raggiunge la velocità di regime, in quanto la distanza interstazionale è ridotta (1'350 m). Per accelerazioni maggiori il tratto a regime diviene più significativo e si riduce di pari passo l'occupazione della sezione di blocco. Per le accelerazioni più elevate non vi è una grossa differenza perché viene comunque raggiunta la velocità di regime e quindi la linea viene tendenzialmente sfruttata alla massima capacità.

7.1.1.4 Lunghezza del treno

Come nei casi precedenti, la lunghezza scelta come riferimento è rappresentativa ma, nelle linee reali, possono circolare treni con diverse composizioni e lunghezze, pertanto si considerano ulteriori possibilità. I risultati sono i seguenti.

% di lunghezza del treno	60%	80%	100%	120%	140%	160%	180%	200%
Numero di carrozze	1+1+1	1+2+1	1+3+1	1+4+1	1+5+1	1+6+1	1+7+1	1+8+1
Lunghezza del treno [m]	<u>78.9</u>	<u>105.0</u>	<u>131.0</u>	<u>157.0</u>	<u>183.0</u>	<u>209.0</u>	<u>235.1</u>	<u>261.1</u>
Massa in servizio [t]	210	278	346	414	482	550	618	686
T/O	18	18	18	17	17	17	17	16
T.O.I. [min]	49.6	50.3	50.9	48.7	49.2	49.8	50.4	48.0
T.S. [min]	8.8	8.9	9.0	8.6	8.7	8.8	8.9	8.5
C.I. [min]	1.6	0.9	0.1	2.8	2.1	1.4	0.7	3.5
% T.O.I. [%]	82.7%	83.8%	84.8%	81.1%	82.1%	83.1%	84.0%	80.0%
% T.S. [%]	14.6%	14.8%	15.0%	14.3%	14.5%	14.7%	14.8%	14.1%
% C.I. [%]	2.7%	1.4%	0.2%	4.6%	3.5%	2.3%	1.1%	5.9%

Tabella 7.1.7: Risultati al variare della lunghezza del treno di servizio - linea suburbana - Blocco Fisso

La rappresentazione grafica è la seguente.

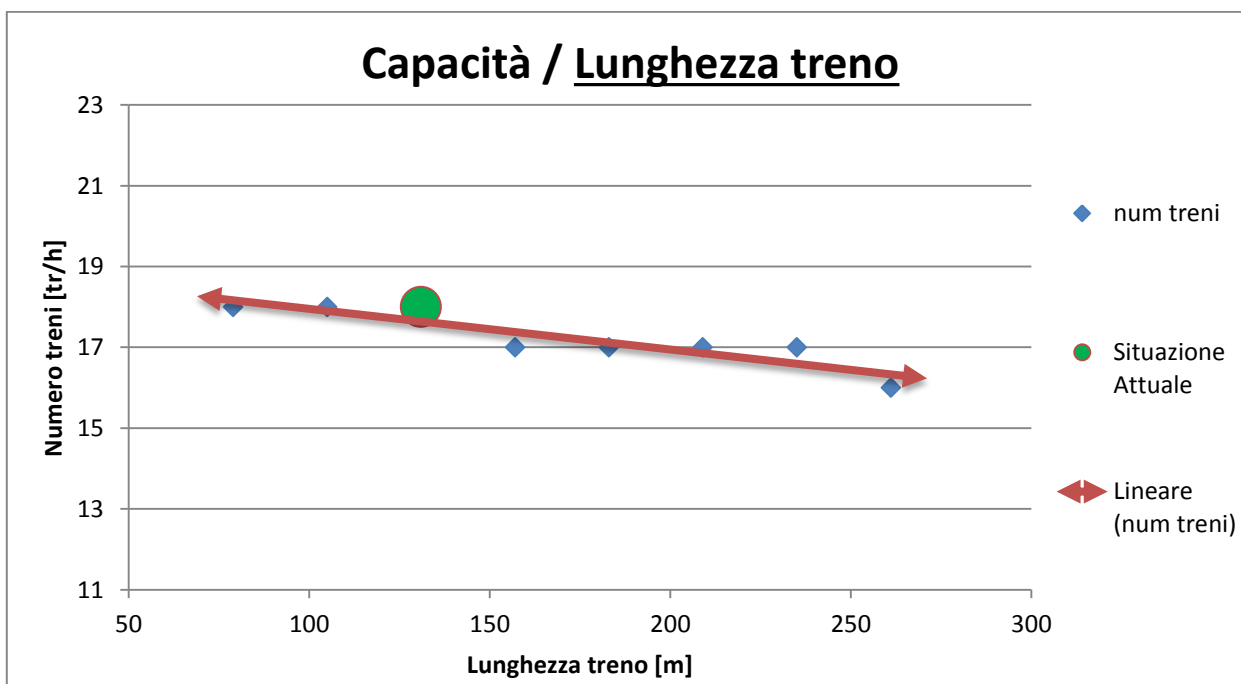


Grafico 7.1.3: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso

Questo parametro ha un'incidenza inferiore ai precedenti, anche per elevate variazioni di lunghezza del convoglio si hanno variazioni massime di 2 treni/ora nel caso studiato. La lunghezza del treno, all'interno del calcolo della capacità, interviene principalmente nel tempo di liberazione, che comunque non è trascurabile rispetto al tempo di percorrenza della sezione e del tempo di approccio.

Con l'aumento della lunghezza del convoglio il suo rapporto peso/potenza rimane invariato e di conseguenza anche le prestazioni in accelerazione, grazie alla potenza distribuita di questa tipologia di treno. Al contrario, se la potenza rimanesse costante, l'aumento di lunghezza e quindi di massa, porterebbe a limitare l'accelerazione di servizio per velocità sempre minori. Tuttavia, dopo aver analizzato tale caso con il software, questo effetto secondario porta a variazioni contenute nei risultati ottenuti e a nessuna differenza in termini di treni/ora.

7.1.1.5 Tempo di fermata

Sono stati considerati vari tempi di fermata oltre a quello più rappresentativo pari ad un minuto. I più bassi considerati non sono realistici, ma da un punto di vista teorico sono comunque significativi perché permettono di studiare la capacità e capirne meglio l'andamento.

Tempo di fermata [s]	<u>20</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>50</u>	60	<u>70</u>	<u>80</u>	<u>90</u>	<u>100</u>	<u>110</u>	<u>120</u>
T/O	23	21	20	19	18	17	16	15	14	13	13
T.O.I. [min]	49.7	48.9	49.9	50.5	50.9	50.9	50.6	49.9	48.9	47.6	49.8
T.S. [min]	8.8	8.6	8.8	8.9	9.0	9.0	8.9	8.8	8.6	8.4	8.8
C.I. [min]	1.5	2.5	1.3	0.5	0.1	0.1	0.5	1.3	2.5	4.0	1.5
% T.O.I. [%]	82.8%	81.4%	83.1%	84.2%	84.8%	84.8%	84.3%	83.2%	81.5%	79.3%	82.9%
% T.S. [%]	14.6%	14.4%	14.7%	14.9%	15.0%	15.0%	14.9%	14.7%	14.4%	14.0%	14.6%
% C.I. [%]	2.6%	4.2%	2.2%	0.9%	0.2%	0.2%	0.8%	2.1%	4.1%	6.7%	2.4%

Tabella 7.1.8: Risultati al variare del tempo di fermata - linea suburbana - Blocco Fisso

Il grafico presenta l'andamento della capacità, si può osservare come il tempo di fermata sia il parametro che (nell'intervallo di valori studiato) incide maggiormente sulla capacità.

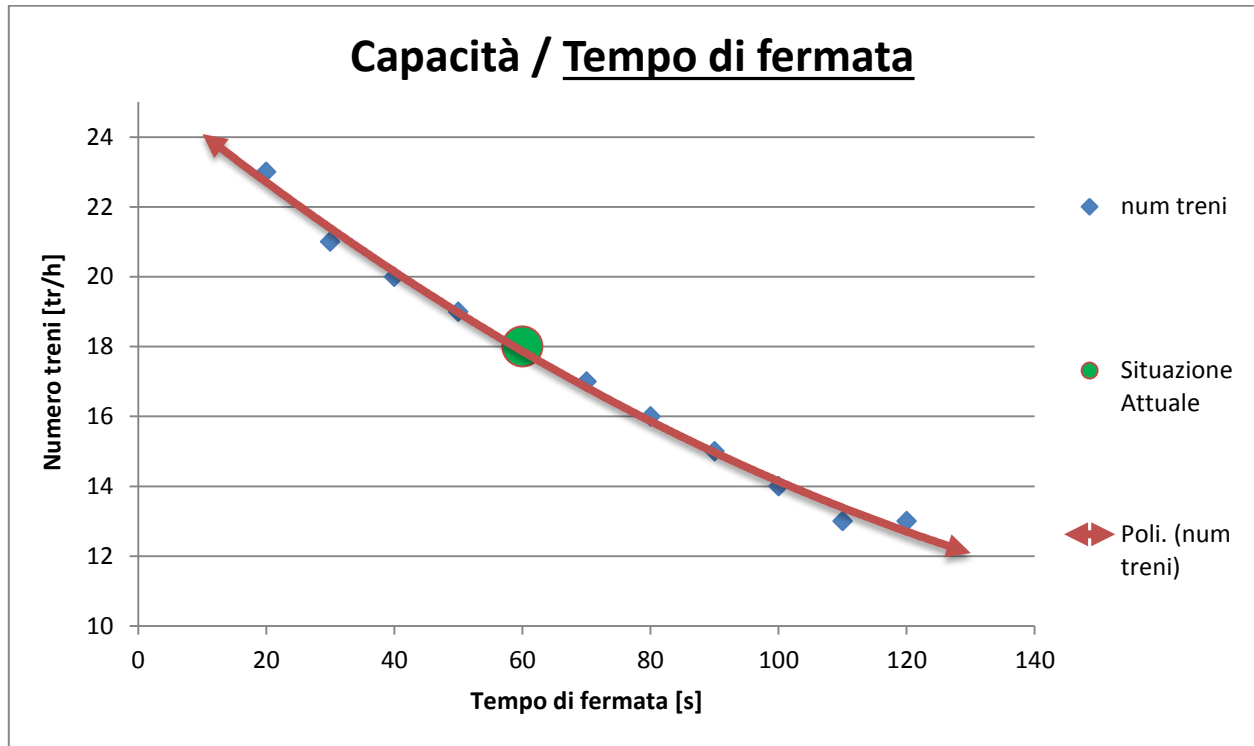


Grafico 7.1.4: Legame tra tempo di fermata e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso

Il numero massimo di treni che possono circolare è inversamente proporzionale alla durata della fermata. Sono sufficienti poche decine di secondi in più a fermata, per determinare una diminuzione netta della capacità. Questo è dovuto al fatto che la sezione di blocco critica è quella contenente la stazione. Infatti, durante la sosta, la sezione rimane occupata, inoltre, immediatamente prima e dopo la sosta, il treno decelera e accelera, due operazioni che incrementano ulteriormente il tempo di blocco delle sezioni contenenti le fermate.

Dal momento che i treni effettuano tutti le stesse fermate, si ha che la capacità è indipendente dal numero delle stesse.

7.1.1.6 Lunghezza delle sezioni di blocco

Alla velocità di tracciato assunta (60 km/h), è possibile l'arresto in uno spazio inferiore alla sezione di blocco di riferimento. Si è quindi fatta variare la lunghezza delle sezioni sia in difetto che in eccesso rispetto al caso base pur mantenendo invariata la distanza interstazionale di 1'350 m.

<u>Lunghezza delle sezioni di blocco</u> [m]	<u>225</u>	<u>270</u>	<u>337.5</u>	<u>450</u>	<u>675</u>
T/O	20	20	19	18	15

T.O.I. [min]	50.3	49.7	49.2	50.9	49.6
T.S. [min]	8.9	8.8	8.7	9.0	8.8
C.I. [min]	0.8	1.5	2.1	0.1	1.6
% T.O.I. [%]	83.8%	82.9%	82.0%	84.8%	82.7%
% T.S. [%]	14.8%	14.6%	14.5%	15.0%	14.6%
% C.I. [%]	1.4%	2.5%	3.5%	0.2%	2.7%

Tabella 7.1.9: Risultati al variare della lunghezza delle sezioni di blocco - linea suburbana - Blocco Fisso

La rappresentazione dei risultati ottenuti è mostrata nel seguente grafico.

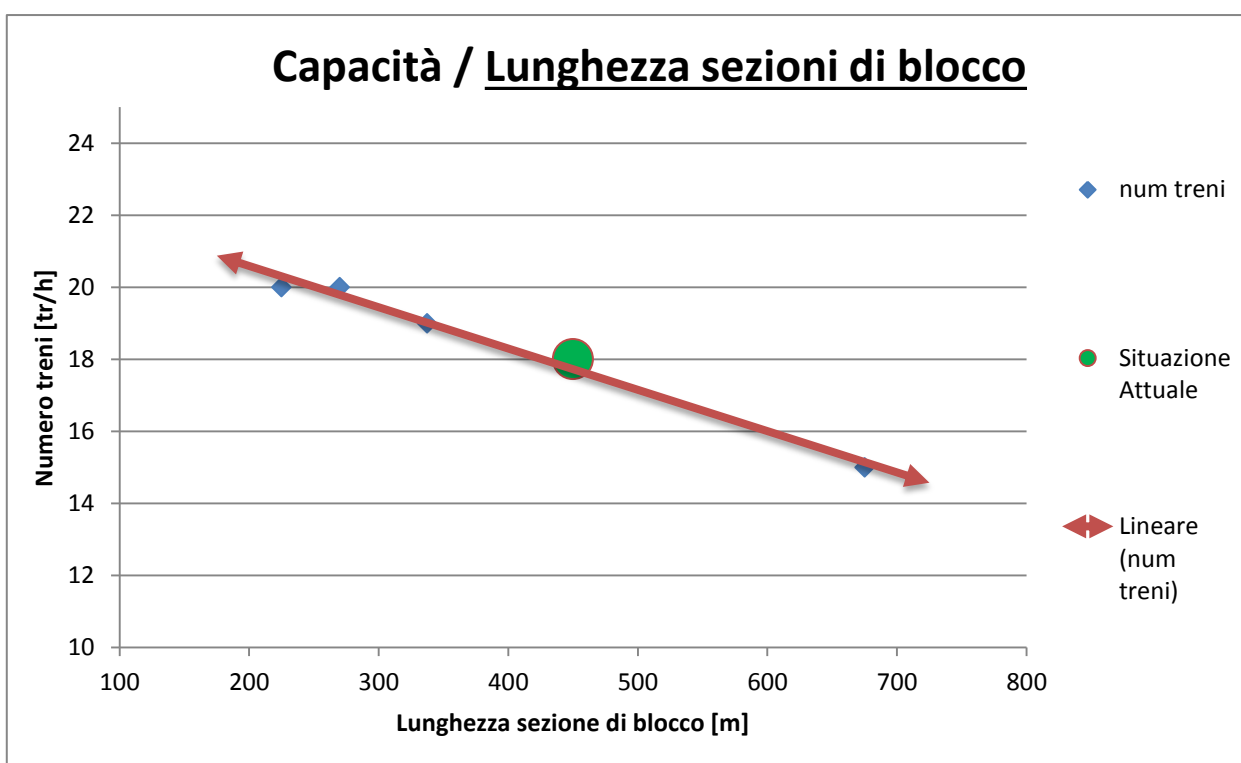


Grafico 7.1.5: Legame tra lunghezza delle sezioni di blocco e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso

Tra capacità e lunghezza delle sezioni di blocco vi è un legame inversamente proporzionale. La variazione del numero di treni è notevole, si passa da 20 treni/ora per sezioni da 225 m a 15 treni/ora per sezioni lunghe 675 m. Si osserva che le sezioni di blocco del caso attuale non sono ottimizzate rispetto alla velocità della linea. A 60 km/h è possibile l'arresto in uno spazio ridotto, che permette quindi di assumere sezioni di blocco di lunghezza fino a 225 m.

7.1.1.7 Potenza continuata

Le possibilità offerte sul mercato dei materiali rotabili sono numerose, pertanto si osserverà come varia la capacità nel caso di utilizzo di treni con motori di diversa potenza.

Potenza continuata [kW]	<u>2200</u>	<u>2600</u>	<u>3000</u>	<u>3400</u>	<u>3800</u>	<u>4200</u>	<u>4600</u>	<u>5000</u>
T/O	17	18	18	18	18	18	18	18
T.O.I. [min]	48.2	50.9	50.9	50.9	50.9	50.9	50.9	50.9
T.S. [min]	8.5	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
C.I. [min]	3.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
% T.O.I. [%]	80.3%	84.8%	84.8%	84.8%	84.8%	84.8%	84.8%	84.8%
% T.S. [%]	14.2%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%
% C.I. [%]	5.5%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%

Tabella 7.1.10: Risultati al variare della potenza continuata - linea suburbana - Blocco Fisso

Di seguito la rappresentazione grafica.

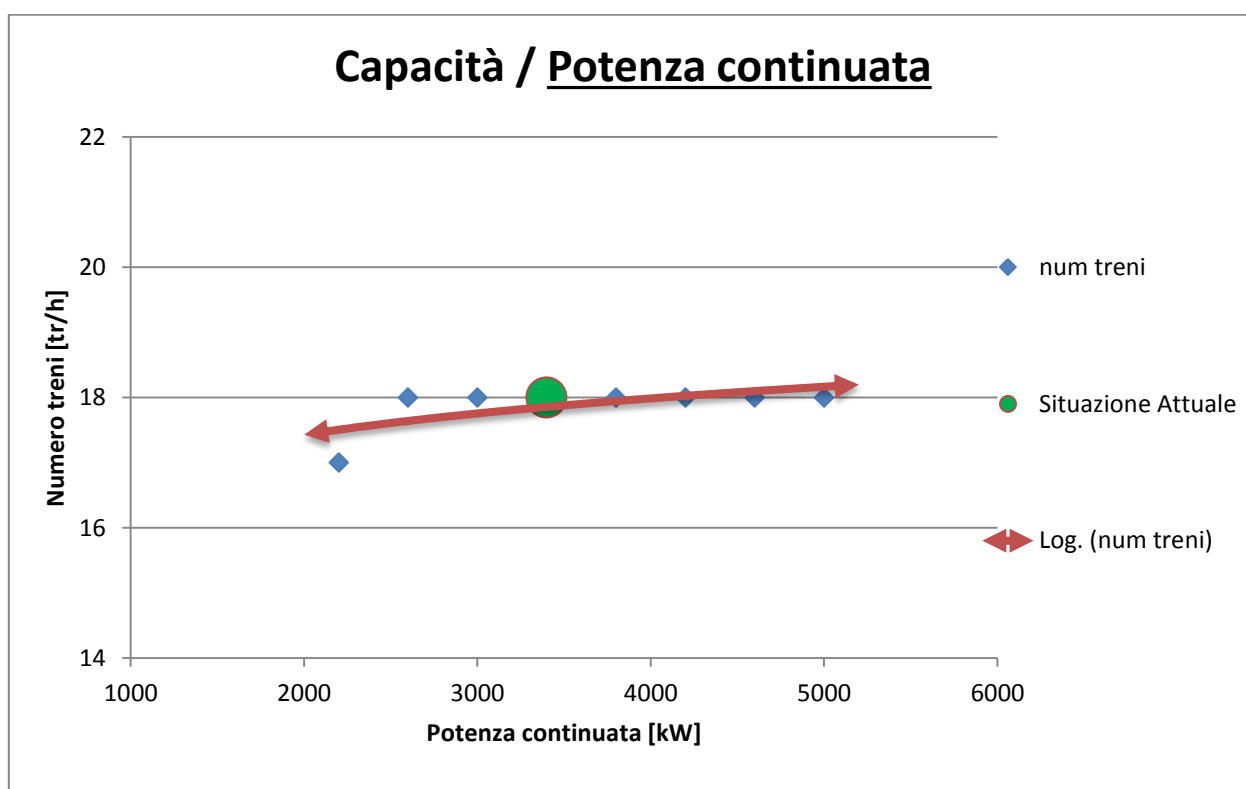


Grafico 7.1.6: Legame tra potenza continuata e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso

La potenza ha scarsa influenza sulla capacità, il numero di treni prevedibile rimane pressoché costante. In teoria, all'aumentare della potenza, sarebbe possibile sfruttare accelerazioni maggiori (non solo allo spunto, ma anche a velocità "elevate") e quindi ridurre i tempi di occupazione. Ciò però non avviene poiché le velocità sono basse e ricadono nella zona di caratteristica meccanica limitata dalla massima accelerazione consentita per il comfort dei passeggeri. Pertanto la situazione rimane identica da 2'600 kW in su.

7.1.1.8 Velocità d'orario

Un altro parametro che influenza la capacità della linea è la velocità d'orario. Questa rappresenta la velocità massima che viene raggiunta dal treno in caso di marcia regolare e solitamente viene assunta come il 95% della velocità di tracciato. Di seguito si riportano i risultati al variare delle velocità considerate.

Velocità d'orario [km/h]	<u>49</u>	<u>53</u>	<u>57</u>	<u>61</u>	<u>67</u>	<u>74</u>	<u>81</u>
T/O	17	17	18	18	18	18	19
T.O.I. [min]	49.9	48.9	50.9	50.1	49.2	48.4	50.5
T.S. [min]	8.8	8.6	9.0	8.8	8.7	8.5	8.9
C.I. [min]	1.3	2.5	0.1	1.0	2.1	3.0	0.6
% T.O.I. [%]	83.2%	81.5%	84.8%	83.6%	82.1%	80.7%	84.2%
% T.S. [%]	14.7%	14.4%	15.0%	14.7%	14.5%	14.2%	14.9%
% C.I. [%]	2.1%	4.1%	0.2%	1.7%	3.5%	5.0%	1.0%

Tabella 7.1.11: Risultati al variare della velocità d'orario - linea suburbana - Blocco Fisso

Il grafico seguente esemplifica il legame tra capacità e velocità.

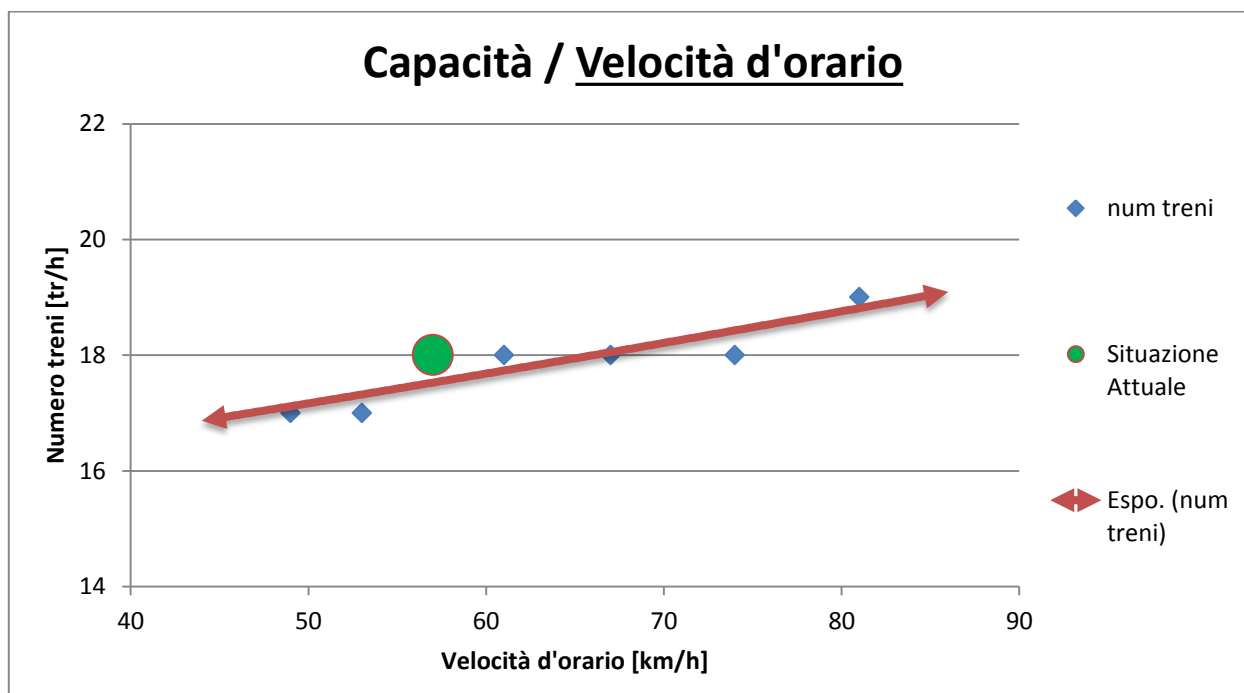


Grafico 7.1.7: Legame tra velocità d'orario e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Fisso

La capacità cresce linearmente con la velocità d'orario. Questo risultato è ampiamente prevedibile poiché l'occupazione della sezione di blocco ha durata inversamente proporzionale alla velocità di

transito del treno. Tuttavia ciò è osservabile soltanto su un ampio range di velocità, per ridotte variazioni del parametro l'effetto non è rilevante.

7.1.1.9 Sintesi dei risultati ottenuti

Ricapitolando quanto dedotto nei paragrafi precedenti, è possibile riassumere i risultati ottenuti in un grafico che mostra l'effetto dei vari parametri sulla capacità. Per ottenere un'unica rappresentazione si sono considerate le variazioni dei vari parametri in percentuale rispetto alla situazione del caso base attuale.

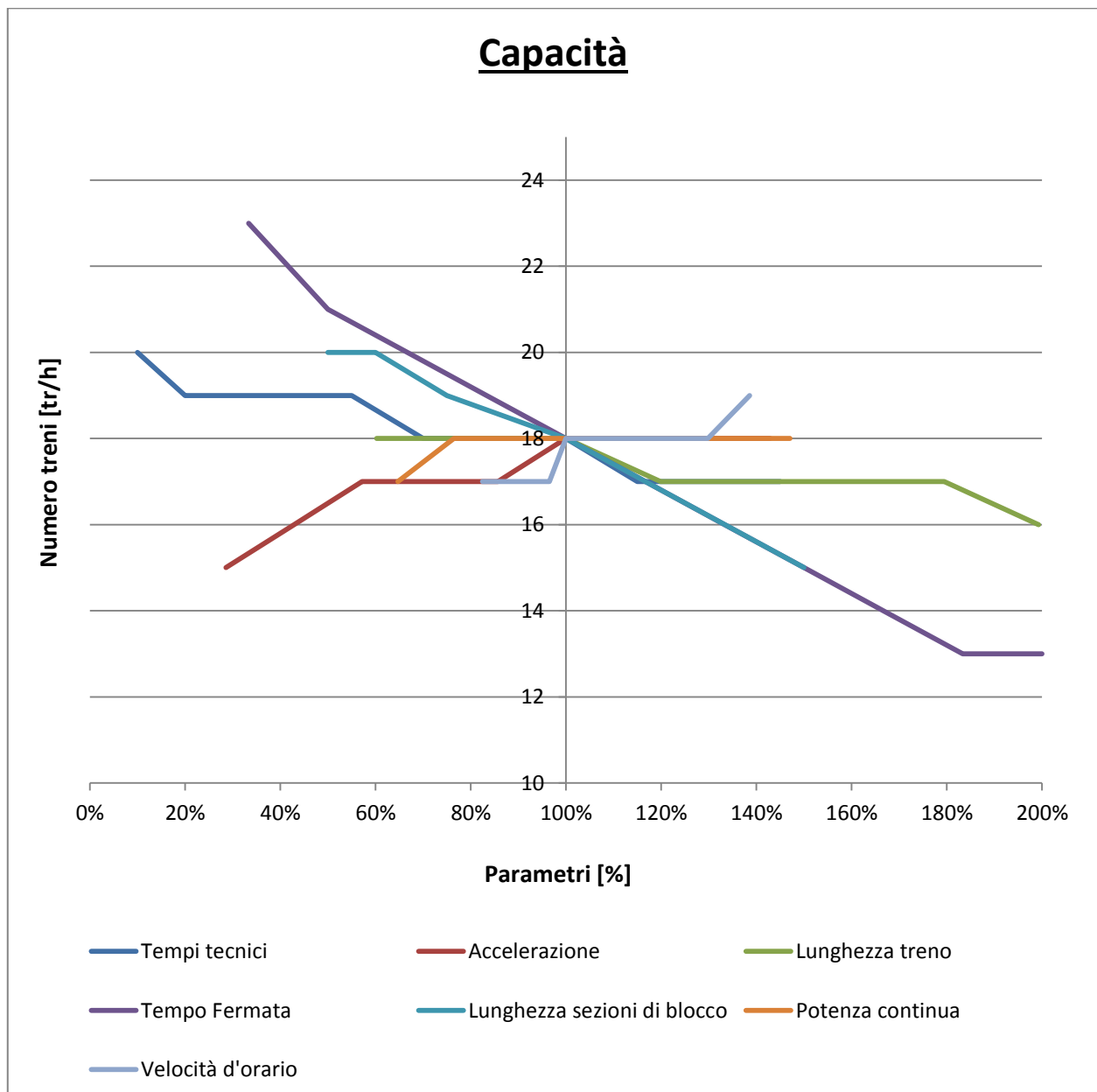


Grafico 7.1.8: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea suburbana – Blocco Fisso

I parametri maggiormente incidenti sulla variazione di capacità sono il tempo di fermata, i tempi tecnici e la lunghezza delle sezioni di blocco. Il primo di questi dipende principalmente dalle caratteristiche di accessibilità delle vetture come l'altezza del pianale, numero delle porte, ecc. Gli ultimi due parametri dipendono invece dalle caratteristiche della linea e del distanziamento.

Se si considera la velocità massima come limite dovuto alla linea ferroviaria (e non al mezzo), essa è, tra i parametri dell'infrastruttura, quella con il peso minore.

Tra le caratteristiche meccaniche del materiale rotabile, solo l'accelerazione ha un peso notevole, ma soltanto per valori inferiori rispetto al caso base.

I parametri che in assoluto risultano meno importanti sono la lunghezza del treno e la potenza continuata.

Il grafico riporta soltanto l'opportunità tecnica e non economica riguardo alla variazione dei parametri, infatti alcuni di essi sono effettivamente variabili con dispendio economico elevato.

In alcuni casi, pur senza modifica del numero di treni prevedibili, la variazione di alcuni parametri può portare a vantaggi in termini di stabilità dell'orario, riducendo il tempo di occupazione dell'infrastruttura. Lo si può osservare nel Grafico 7.1.9, dove sono state riportate le percentuali di occupazione di infrastruttura riferite al numero di treni originariamente previsti nell'orario.

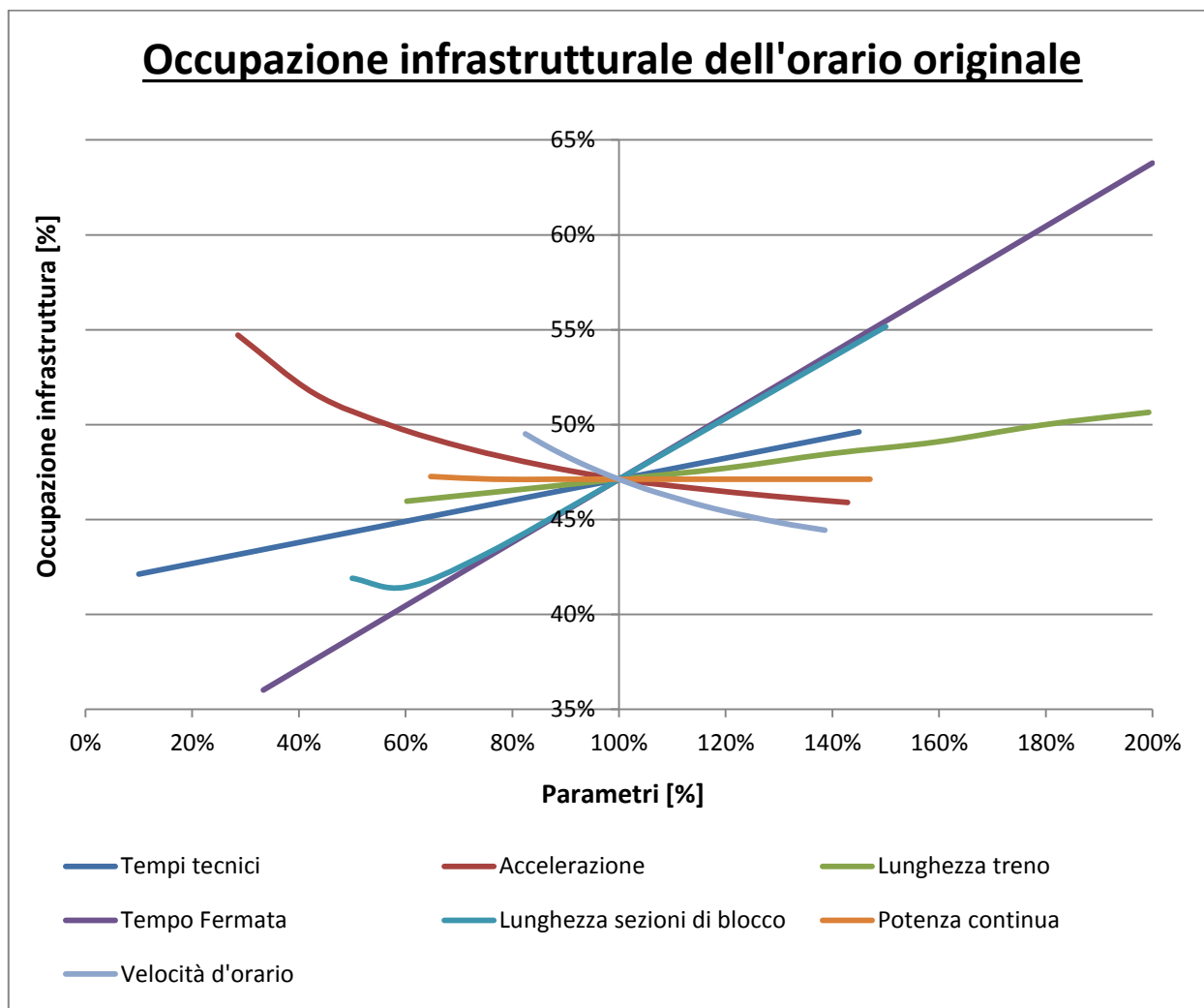


Grafico 7.1.9: Occupazione ddi infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea suburbana – Blocco Fisso

Anche i parametri che non danno variazione di capacità offrono un contributo alla variazione di occupazione dell'infrastruttura, ovviamente in modo ridotto rispetto ai parametri maggiormente incidenti sulla potenzialità della linea.

7.1.2 Blocco Mobile

Questo tipo di segnalamento può essere rappresentativo di una linea ferroviaria predisposta per lo standard ERTMS L3. In ogni caso l'infrastruttura è ora priva di sezioni di blocco ed il distanziamento dei treni viene regolato in continuo da una stazione centrale in funzione della velocità dei mezzi.

In questo paragrafo sono stati utilizzati i codici di calcolo riferiti agli algoritmi di Figura 6.2.1, Figura 6.4.3 e Figura 6.4.4.

7.1.2.1 Situazione di base

Così come per il caso di distanziamento a Blocco Fisso, è stato necessario definire una situazione base, in modo da riferirsi sempre a questa, variando di volta in volta uno solo dei parametri. In questo caso però la situazione non è rappresentativa di una realmente esistente, poiché tale sistema di distanziamento non è ancora diffusamente presente. Si è applicato sulla medesima linea, lo stesso orario precedente, mentre i parametri definenti il distanziamento nella situazione di base sono i seguenti.

Tempo per il controllo dell'integrità del treno [s]	9
Tempo per la trasmissione dei dati tra treno1 e RBC [s]	3.5
Tempo di elaborazione del RBC [s]	3
Tempo per la trasmissione dei dati tra RBC e treno2 [s]	3.5
Tempo di elaborazione del computer di bordo [s]	3
Tempo di reazione del macchinista [s]	3
<i>Tempo totale [s]</i>	25
Franco di sicurezza [m]	100

Tabella 7.1.12: Tempi di blocco e Franco di sicurezza – linea suburbana – Blocco Mobile

Se si applica questo scenario all'orario originale precedentemente presentato (10 treni/ora), si ottengono i seguenti risultati.

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	22.3
Tempo di sicurezza [min]	3.9
Capacità inutilizzata [min]	33.8
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	37.2 %
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	6.6 %
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	56.3 %
Treni per ora	10
Velocità media delle tracce [km/h]	28
Consumo di capacità [%]	43.8 %
Stabilità	62.9 %
Eterogeneità	0.0 %

Tabella 7.1.13: Risultati della compressione dell'orario originale – linea suburbana – Blocco Mobile

Come in precedenza, si nota che, anche con il distanziamento a Blocco Mobile, possono essere inseriti nell'orario ulteriori treni fino al raggiungimento del limite di occupazione consigliato dall'UIC. Si sono ottenuti i seguenti valori:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	49.1
Tempo di sicurezza [min]	8.7
Capacità inutilizzata [min]	2.2
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	81.9 %
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	14.4 %
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	3.7 %
Treni per ora	22
Velocità media delle tracce [km/h]	28
Consumo di capacità [%]	96.3 %
Stabilità	17.8 %
Eterogeneità	0.0 %

Tabella 7.1.14: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea suburbana– Blocco Mobile

Si stima dunque un possibile incremento di 12 treni/ora. Rispetto al distanziamento a Blocco Fisso è possibile l'inserimento di ulteriori 4 treni/ora. Questo risultato è motivato dall'utilizzo più razionale che questo tipo di distanziamento fa della linea, valutando l'occupazione in funzione della velocità corrente del treno. In questo caso può intendersi l'occupazione non come il tratto di linea fisicamente occupato dal treno, ma come lo spazio che deve essere necessariamente libero dinnanzi ad esso.

La trattazione di Poggio (paragrafo 3.3.1) prevede che i maggiori vantaggi del Blocco Mobile si verificano per linee a bassa velocità. Pur trattandosi di un'analisi di prima approssimazione, essa fornisce un'indicazione che effettivamente si riscontra nello studio qui compiuto.

Di seguito si analizzano i risultati di capacità al variare dei parametri analizzati, in modo da considerare una vasta gamma di casi, comprensiva di diverse possibili situazioni reali.

7.1.2.2 Tempi tecnici

La scelta dei tempi tecnici è molto importante, si tratta infatti di uno dei due parametri che realizza il distanziamento a Blocco Mobile (l'altro è il franco di sicurezza). Non essendo diffusa come tecnologia, in base alla documentazione reperita [17], è stata fatta una scelta per lo scenario di base, ma comunque lo studio verrà effettuato su un range ampio: si è deciso di arrivare fino a 35 s, caso che potrebbe adattarsi ai primi utilizzi in assoluto, che plausibilmente saranno cautelativi.

Di seguito sono indicati i tempi tecnici totali, in cui i singoli addendi (controllo integrità del treno, trasmissione dati, ecc.) sono stati aumentati e diminuiti mantenendo la stessa proporzione dello scenario di base.

Tempi tecnici [s]	6	8.5	12.5	16.5	20.5	25	30	35
T/O	26	25	25	24	23	22	22	21
T.O.I. [min]	49.4	49.1	50.8	50.4	49.8	49.1	50.6	50.4
T.S. [min]	8.7	8.7	9.0	8.9	8.8	8.7	8.9	8.9
C.I. [min]	1.9	2.2	0.2	0.7	1.4	2.2	0.5	0.7
% T.O.I. [%]	82.3%	81.9%	84.7%	84.0%	83.0%	81.9%	84.3%	84.0%
% T.S. [%]	14.5%	14.5%	14.9%	14.8%	14.6%	14.4%	14.9%	14.8%
% C.I. [%]	3.1%	3.7%	0.4%	1.2%	2.3%	3.7%	0.8%	1.2%

Tabella 7.1.15: Risultati al variare del tempo tecnico - linea suburbana - Blocco Mobile

Nel grafico seguente si può osservare l'incidenza della variazione dei tempi tecnici sulla capacità.

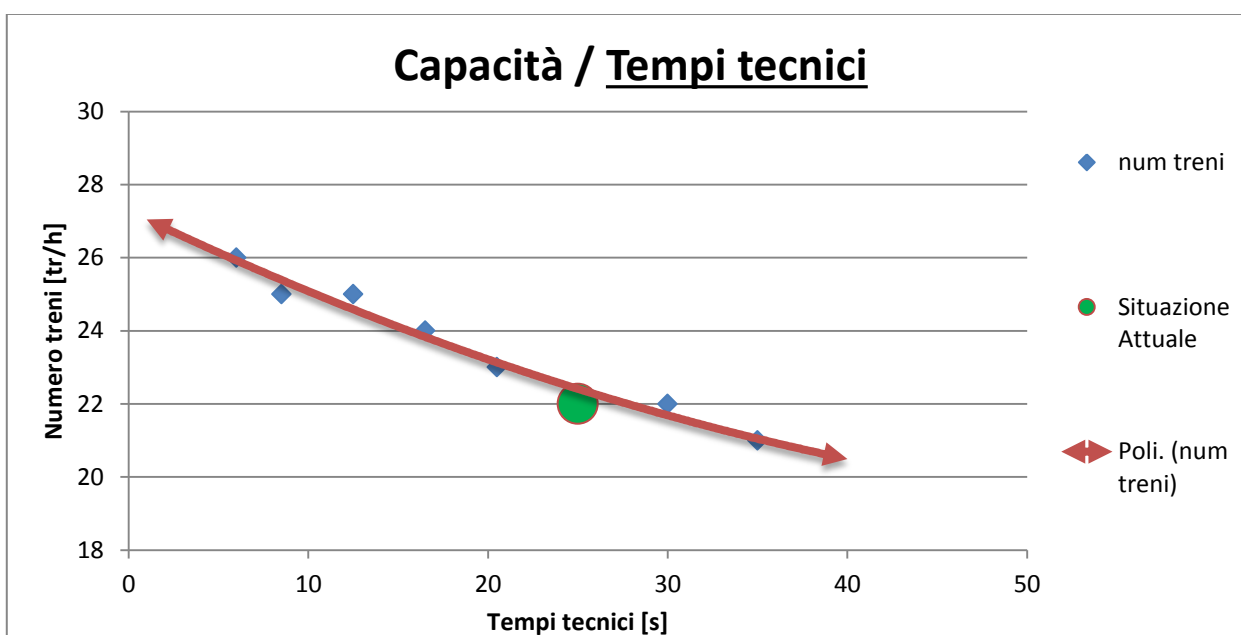


Grafico 7.1.10: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile

Si passa da 26 treni/ora per tempi tecnici di 6 s, a 21 treni/ora per tempi tecnici pari a 35 s. Il legame è inversamente proporzionale, infatti i tempi tecnici necessari per la trasmissione delle informazioni da un treno al seguente determinano un perditempo che obbliga a tenere una distanza di sicurezza aggiuntiva pari al prodotto tra la velocità del treno ed i tempi tecnici. Questo provoca un sensibile aumento dell'occupazione dell'infrastruttura e una conseguente diminuzione della capacità.

7.1.2.3 Accelerazione di servizio

Si sono studiati i casi di variazione di accelerazione già considerati nell'analogo esempio di distanziamento a Blocco Fisso.

% di acc. di servizio	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%
Acc. di servizio [m/s ²]	<u>0.18</u>	<u>0.27</u>	<u>0.36</u>	<u>0.45</u>	<u>0.54</u>	<u>0.63</u>	<u>0.72</u>	<u>0.81</u>	<u>0.9</u>	<u>0.99</u>	<u>1.08</u>	<u>1.17</u>	<u>1.26</u>
T/O	18	20	21	22	22	22	23	23	23	23	23	23	23
T.O.I. [min]	49.2	50.0	50.4	50.6	49.8	49.1	50.6	50.6	49.8	49.8	49.1	49.1	49.1
T.S. [min]	8.7	8.8	8.9	8.9	8.8	8.7	8.9	8.9	8.8	8.8	8.7	8.7	8.7
C.I. [min]	2.1	1.2	0.7	0.5	1.4	2.2	0.5	0.5	1.4	1.4	2.3	2.3	2.3
% T.O.I. [%]	82.0%	83.3%	83.9%	84.3%	83.1%	81.9%	84.3%	84.3%	83.0%	83.0%	81.8%	81.8%	81.8%
% T.S. [%]	14.5%	14.7%	14.8%	14.9%	14.7%	14.4%	14.9%	14.9%	14.7%	14.6%	14.4%	14.4%	14.4%
% C.I. [%]	3.5%	2.0%	1.2%	0.8%	2.3%	3.7%	0.8%	0.8%	2.3%	2.3%	3.8%	3.8%	3.8%

Tabella 7.1.16: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea suburbana - Blocco Mobile

Nel grafico seguente sono stati riportati i risultati sopra esposti.

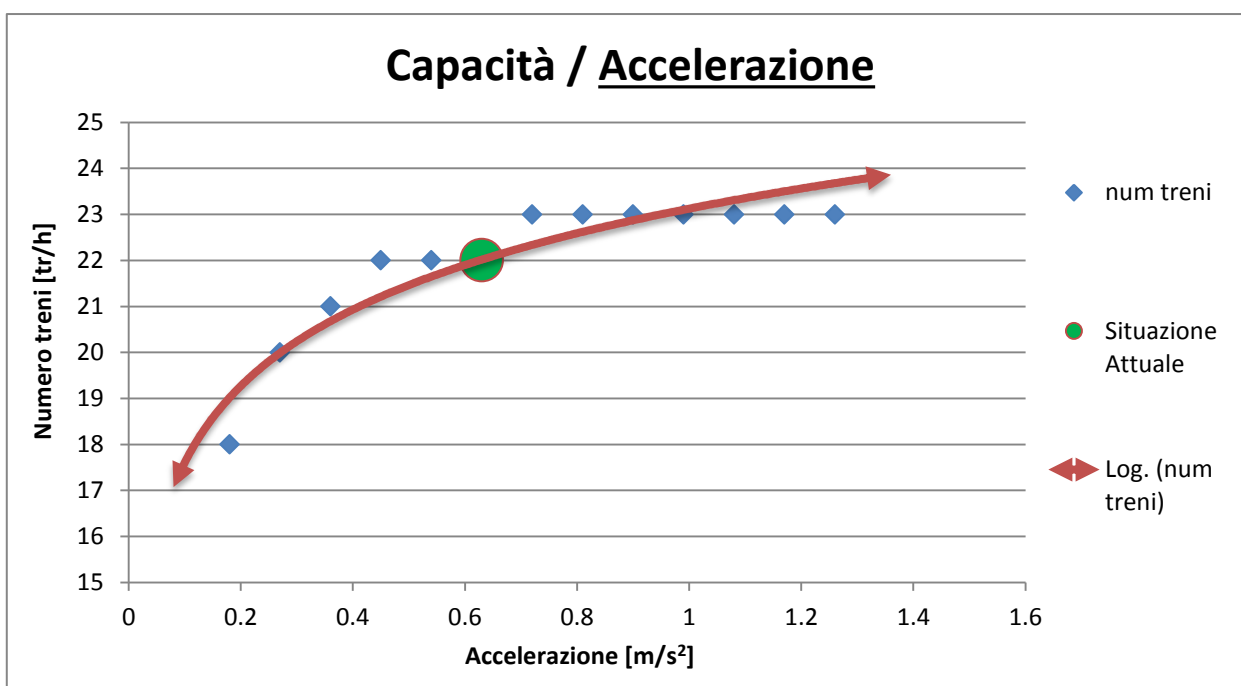


Grafico 7.1.11: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile

L'accelerazione è anche in questo caso un parametro significativo per bassi valori, mentre al suo aumentare la capacità non cresce ulteriormente oltre i 23 treni/ora. Accelerazioni basse

determinano un prolungamento dell'occupazione di infrastruttura e una conseguente riduzione di capacità.

La questione merita un approfondimento, altrimenti potrebbe risultare poco intuitiva. Nella Figura 7.1.2 si vede come la sezione critica si trovi lungo il ramo di accelerazione di un treno ed il distanziamento a regime di quello seguente; se la traccia ha accelerazione bassa vi è un distanziamento temporale maggiore tra due treni successivi, viceversa se l'accelerazione è elevata si ottiene un minor distanziamento.

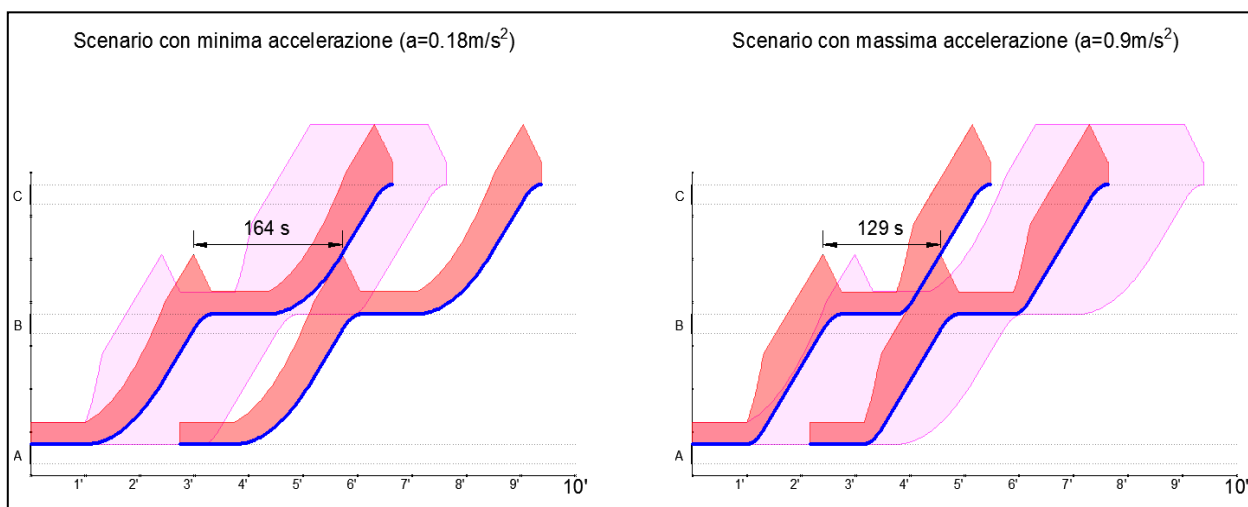


Figura 7.1.2: Variazione del distanziamento in funzione dell'accelerazione

Nella parte sinistra della figura sono rappresentate due tracce caratterizzate dalla minima accelerazione, mentre in trasparenza (area rosa) è rappresentata l'occupazione delle stesse se caratterizzate da massima accelerazione. Viceversa nella parte di destra della figura. Si vede come una maggiore accelerazione permetta una più efficace compattazione delle tracce, consentendo una minore occupazione dell'infrastruttura.

7.1.2.4 Lunghezza del treno

I casi considerati sono i medesimi affrontati precedentemente nel paragrafo 7.1.1.4.

% di lunghezza del treno	60%	80%	100%	120%	140%	160%	180%	200%
Numero di carrozze	1+1+1	1+2+1	1+3+1	1+4+1	1+5+1	1+6+1	1+7+1	1+8+1
Lunghezza del treno	<u>78.9</u>	<u>105.0</u>	<u>131.0</u>	<u>157.0</u>	<u>183.0</u>	<u>209.0</u>	<u>235.1</u>	<u>261.1</u>

[m]								
Massa in servizio [t]	210	278	346	414	482	550	618	686
T/O	23	23	22	22	22	22	21	21
T.O.I. [min]	49.6	50.2	49.1	49.3	49.3	50.5	48.8	21
T.S. [min]	8.8	8.9	8.7	8.7	8.7	8.9	8.6	49.3
C.I. [min]	1.6	0.9	2.2	2.0	2.0	0.6	2.6	8.7
% T.O.I. [%]	82.7%	83.7%	81.9%	82.1%	82.1%	84.1%	81.3%	2.0
% T.S. [%]	14.6%	14.8%	14.4%	14.5%	14.5%	14.8%	14.3%	82.2%
% C.I. [%]	2.7%	1.5%	3.7%	3.4%	3.4%	1.0%	4.4%	14.5%

Tabella 7.1.17: Risultati al variare della lunghezza del treno - linea suburbana - Blocco Mobile

Di seguito si riporta il grafico rappresentante i risultati.

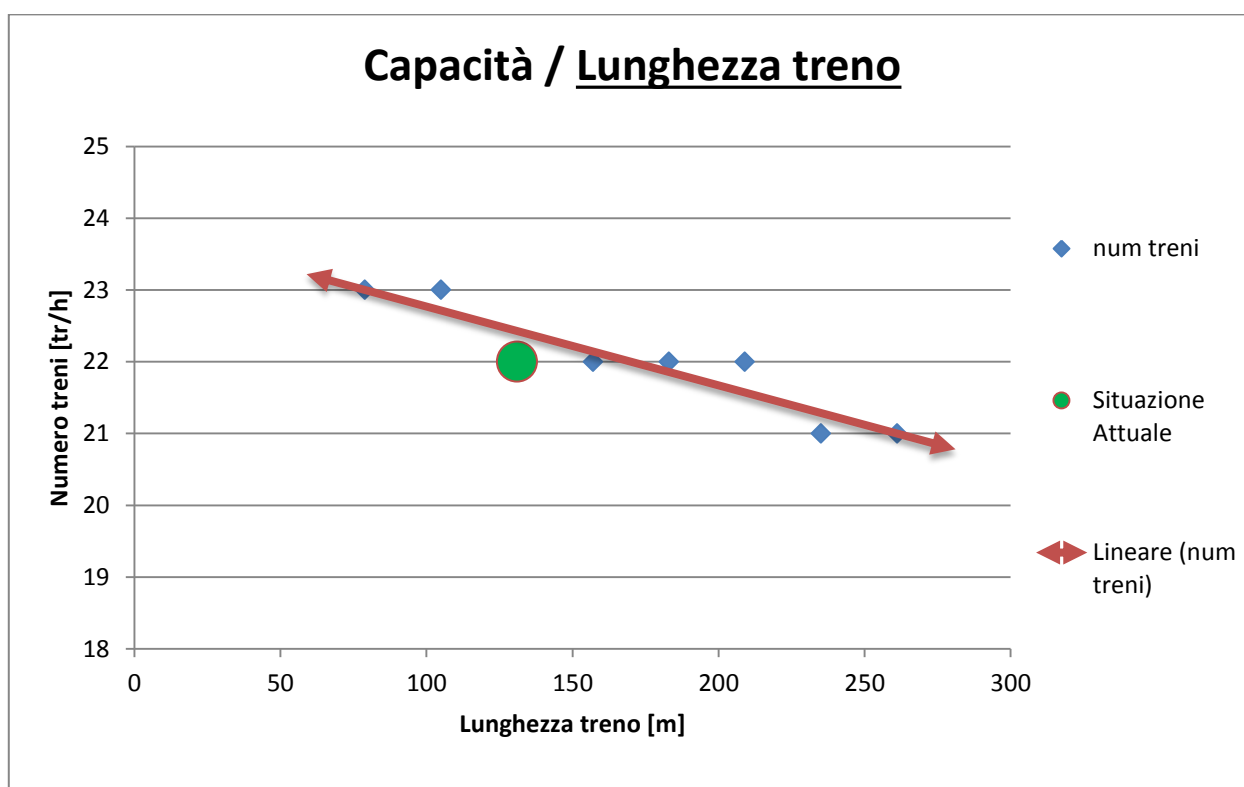


Grafico 7.1.12: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile

L'aumento della lunghezza del treno, anche nel distanziamento a Blocco Mobile, comporta una riduzione della capacità, in quanto il treno occupa fisicamente un qualsiasi tratto di linea per il tempo necessario affinché la testa entri e la coda esca dal tratto analizzato. Comunque non si tratta di un parametro con rilevanza importante sulla capacità.

7.1.2.5 Tempo di fermata

Si sono scelte anche qui le stesse situazioni trattate nel paragrafo 7.1.1.5 per poter poi eseguire un raffronto diretto.

Tempo di fermata [s]	<u>20</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>50</u>	60	<u>70</u>	<u>80</u>	<u>90</u>	<u>100</u>	<u>110</u>	<u>120</u>
T/O	32	29	26	24	22	21	19	18	17	16	15
T.O.I. [min]	50.1	50.2	49.4	49.6	49.1	50.4	48.7	49.2	49.3	49.0	48.5
T.S. [min]	8.8	8.9	8.7	8.7	8.7	8.9	8.6	8.7	8.7	8.7	8.6
C.I. [min]	1.0	0.9	1.9	1.7	2.2	0.7	2.7	2.1	2.0	2.3	3.0
% T.O.I. [%]	83.5%	83.7%	82.3%	82.6%	81.9%	84.0%	81.2%	82.0%	82.1%	81.7%	80.8%
% T.S. [%]	14.7%	14.8%	14.5%	14.6%	14.4%	14.8%	14.3%	14.5%	14.5%	14.4%	14.3%
% C.I. [%]	1.7%	1.5%	3.2%	2.8%	3.7%	1.2%	4.4%	3.6%	3.4%	3.8%	4.9%

Tabella 7.1.18: Risultati al variare del tempo di fermata - linea suburbana - Blocco Mobile

Ne risulta il grafico seguente.

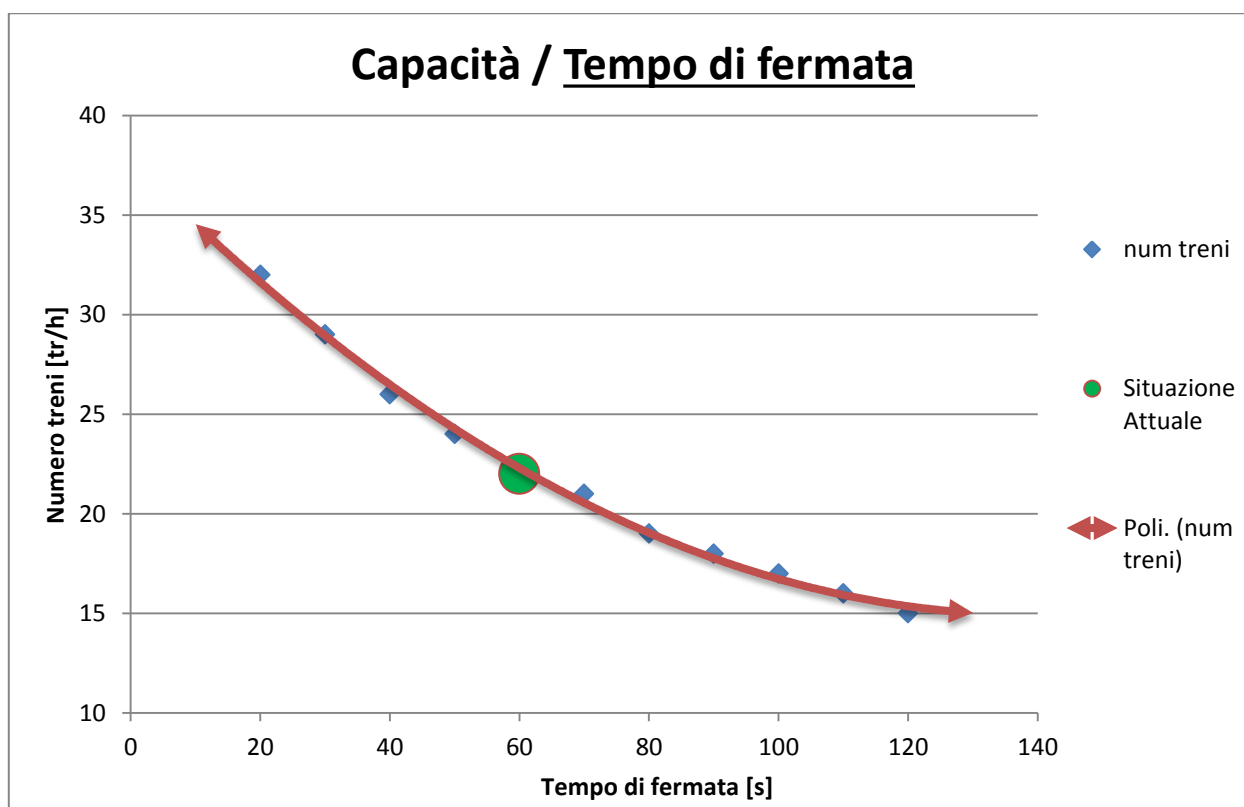


Grafico 7.1.13: Legame tra tempo di fermata e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile

Ancora una volta, si deduce che il tempo di fermata ha un'elevata incidenza sulla capacità. Le considerazioni sono analoghe a quelle espone nel paragrafo 7.1.1.5.

7.1.2.6 Potenza continuata

Sono state considerate le stesse situazioni del paragrafo 7.1.1.7 per poter poi eseguire un raffronto diretto.

Potenza continuata [kW]	<u>2200</u>	<u>2600</u>	<u>3000</u>	<u>3400</u>	<u>3800</u>	<u>4200</u>	<u>4600</u>	<u>5000</u>
T/O	22	22	22	22	22	22	22	22
T.O.I. [min]	49.1	49.1	49.1	49.1	49.1	49.1	49.1	49.1
T.S. [min]	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
C.I. [min]	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
% T.O.I. [%]	81.9%	81.9%	81.9%	81.9%	81.9%	81.9%	81.9%	81.9%
% T.S. [%]	14.4%	14.4%	14.4%	14.4%	14.4%	14.4%	14.4%	14.4%
% C.I. [%]	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%

Tabella 7.1.19: Risultati al variare della potenza continuata - linea suburbana - Blocco Mobile

La variazione di potenza non incide per nulla sulla capacità della linea. Infatti, come detto in precedenza, la parte di caratteristica meccanica utilizzata per la marcia è quella a forza costante (limite di accelerazione per il comfort dei passeggeri) che non viene modificata dall'aumento o diminuzione della potenza nel range considerato.

7.1.2.7 Velocità d'orario

Sono state considerate le seguenti situazioni.

Velocità d'orario [km/h]	49	53	<u>57</u>	59	65	71	77	79
T/O	23	23	22	22	22	21	21	21
T.O.I. [min]	50.6	50.6	49.1	49.1	49.9	49.0	49.7	49.7
T.S. [min]	8.9	8.9	8.7	8.7	8.8	8.6	8.8	8.8
C.I. [min]	0.5	0.5	2.2	2.2	1.3	2.4	1.6	1.5
% T.O.I. [%]	84.3%	84.3%	81.9%	81.9%	83.1%	81.6%	82.8%	82.8%
% T.S. [%]	14.9%	14.9%	14.4%	14.4%	14.7%	14.4%	14.6%	14.6%
% C.I. [%]	0.8%	0.8%	3.7%	3.7%	2.2%	4.0%	2.6%	2.6%

Tabella 7.1.20: Risultati al variare della velocità d'orario - linea suburbana - Blocco Mobile

Il grafico è il seguente.

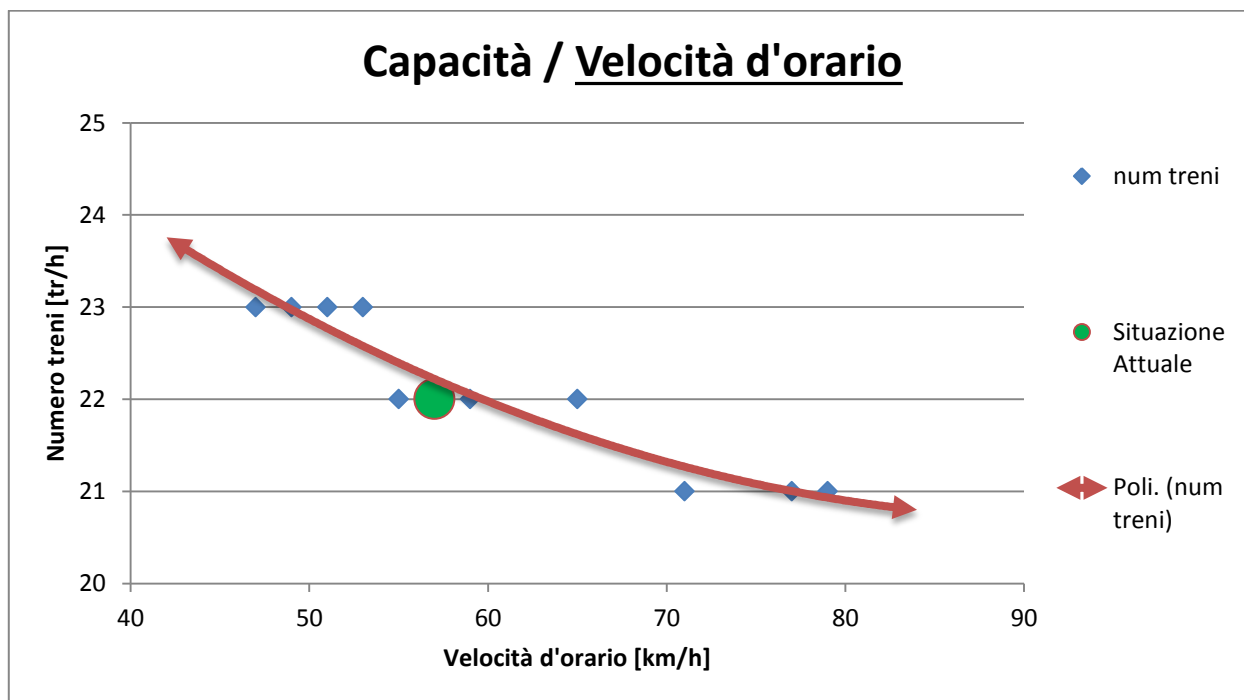


Grafico 7.1.14: Legame tra velocità d'orario e massimo numero di treni – linea suburbana – Blocco Mobile

A differenza del caso di Blocco Fisso, qui il legame tra velocità e capacità è inversamente proporzionale. Questo è dovuto al fatto che a velocità di regime il distanziamento è maggiore (maggiori velocità richiedono un maggior spazio di arresto). Questo risultato è previsto anche nello studio di Poggio, dove ci si trova nel ramo discendente dalla capacità (Grafico 3.3.1). Non sempre un maggior numero di treni/ora va a vantaggio della clientela, soprattutto se ciò va a scapito del tempo di percorrenza complessiva della tratta. Da qui la precisazione dell'UIC e di vari autori (Landex e altri) di non considerare come unica espressione della capacità il numero di treni/ora.

7.1.2.8 Franco di sicurezza

Per il distanziamento a Blocco Mobile del presente caso, date le basse velocità, è stato sufficiente far variare di poche decine di metri il franco di sicurezza. Lo spazio di arresto per velocità di 57 km/h è di 162 m (con decelerazione costante pari a $0,77 \text{ m/s}^2$). Scegliere un franco di 100 m equivale a cautelarsi considerando uno spazio di frenatura del 60% maggiore. Oppure alternativamente può significare che la frenatura può tardare di circa 6 s rispetto alla situazione prevista. Ad ogni modo, la scelta del gestore della rete può essere più o meno prudente rispetto a quella qui compiuta. I seguenti sono i risultati di capacità per una gamma di valori di franco di sicurezza.

Franco di sicurezza [m]	20	40	60	80	100	120	140	160	180
T/O	23	23	23	23	22	22	22	22	22
T.O.I. [min]	49.1	49.8	50.6	50.6	49.1	49.1	49.9	50.6	50.6
T.S. [min]	8.7	8.8	8.9	8.9	8.7	8.7	8.8	8.9	8.9
C.I. [min]	2.3	1.4	0.5	0.5	2.2	2.2	1.3	0.5	0.5
% T.O.I. [%]	81.8%	83.0%	84.3%	84.3%	81.9%	81.9%	83.1%	84.3%	84.3%
% T.S. [%]	14.4%	14.7%	14.9%	14.9%	14.4%	14.5%	14.7%	14.9%	14.9%
% C.I. [%]	3.8%	2.3%	0.8%	0.8%	3.7%	3.7%	2.2%	0.8%	0.8%

Tabella 7.1.21: Risultati al variare del franco di sicurezza - linea suburbana - Blocco Mobile

Il grafico è il seguente.

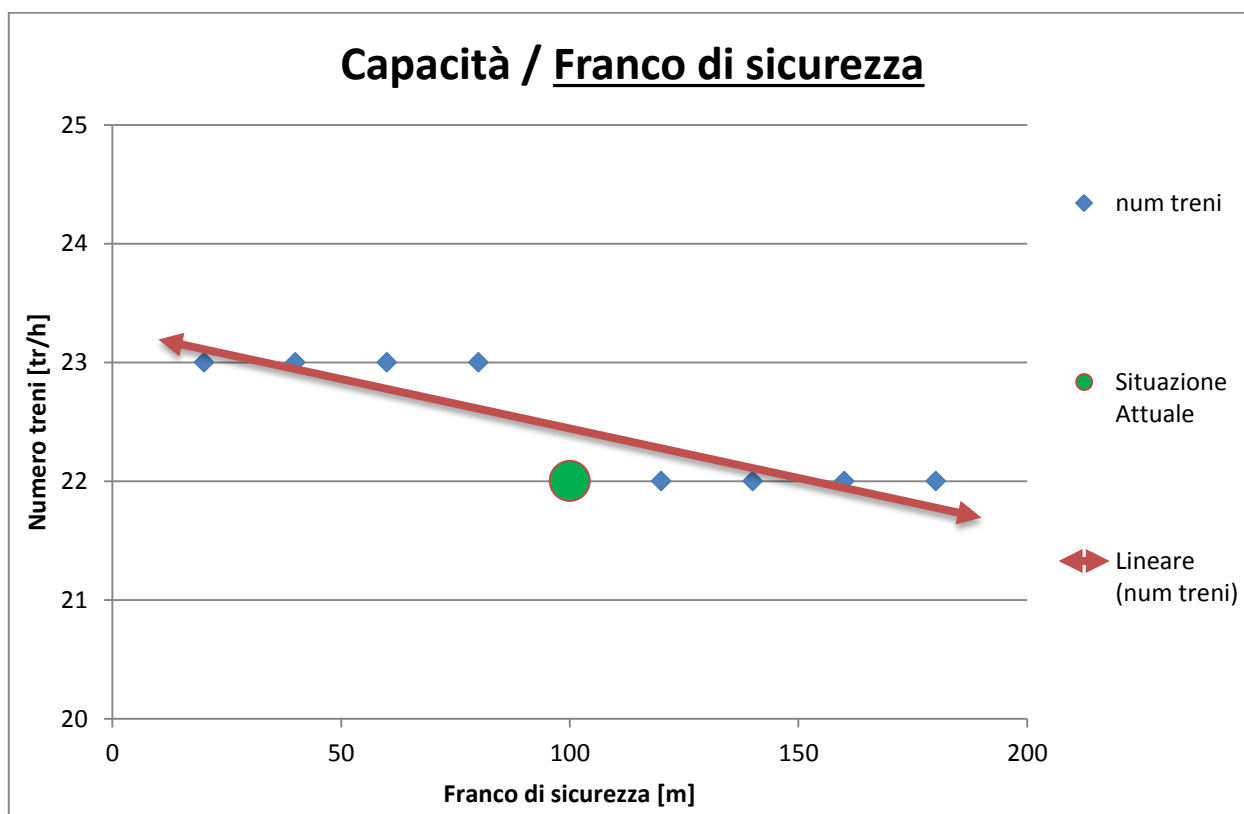


Grafico 7.1.15: Legame tra franco di sicurezza e massimo numero di treni - linea suburbana - Blocco Mobile

Evidentemente una diminuzione del franco permette una maggiore compattazione dei treni in linea. Tuttavia, la variazione del numero di treni prevedibili non è elevata, nel range di variazione considerato il franco di sicurezza non è un parametro di grande influenza sulla capacità.

7.1.2.9 Sintesi dei risultati ottenuti

Ricapitolando quanto dedotto nei paragrafi precedenti, si riassumono i risultati ottenuti in un grafico che mostra l'effetto dei vari parametri sulla capacità. Per ottenere un'unica rappresentazione si sono considerate le variazioni dei parametri in percentuale rispetto alla situazione del caso di base.

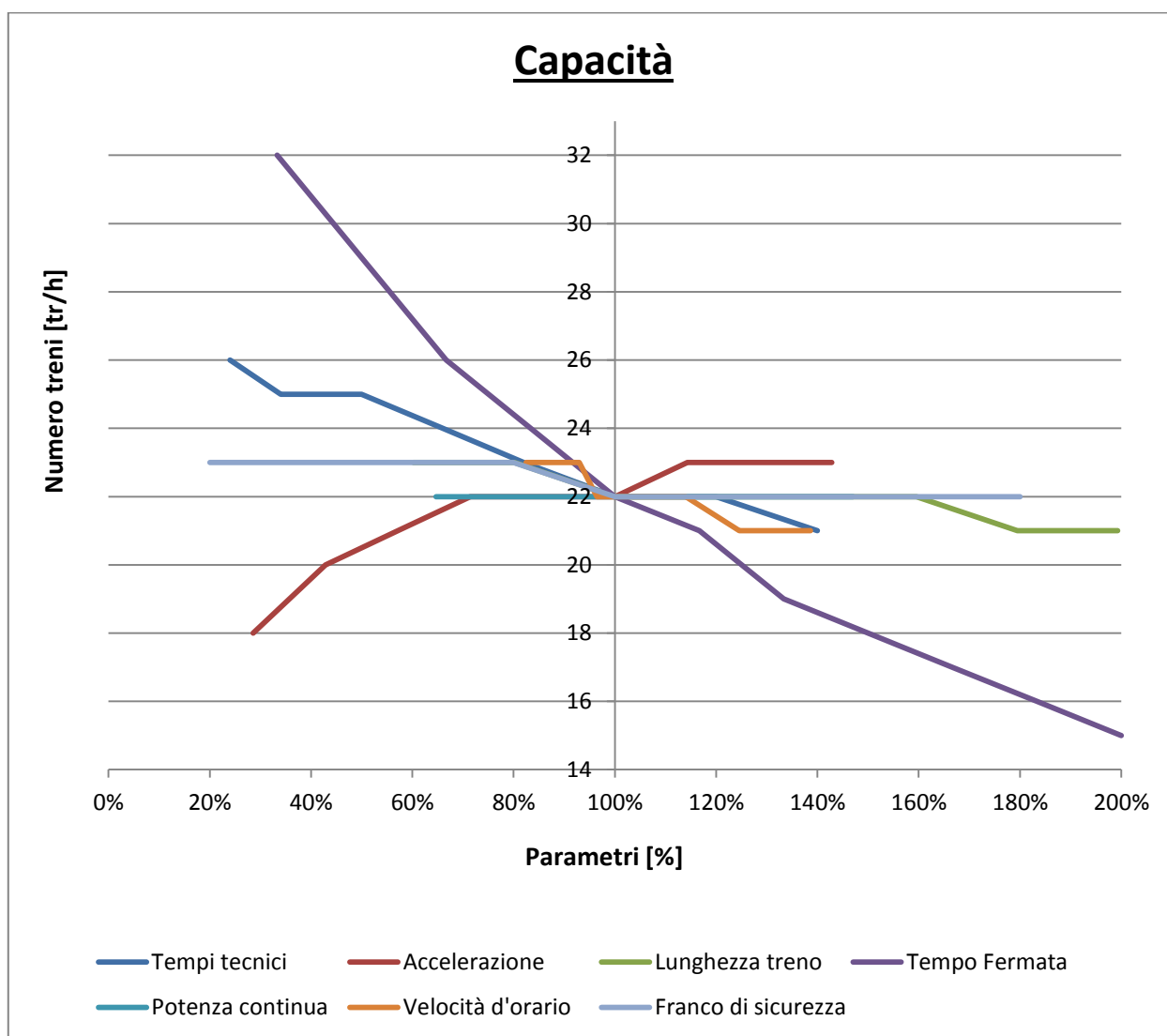


Grafico 7.1.16: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea suburbana – Blocco Mobile

I parametri maggiormente incidenti sulla variazione di capacità sono il tempo di fermata ed i tempi tecnici.

Tra le caratteristiche meccaniche del materiale rotabile, solo l'accelerazione ha un peso notevole sulla capacità, ma soltanto se si considera una diminuzione della stessa rispetto al caso di base.

I parametri che in assoluto risultano avere uno scarso peso sulla capacità sono la lunghezza del treno, il franco di sicurezza e la potenza continuata, quest'ultima in particolar modo.

Si ricorda, come già evidenziato, che ad un'identica percentuale di variazione di due parametri non corrisponde un'eguale fattibilità o eguali costi per attuare la relativa variazione.

In alcuni casi, pur senza modifica del numeri di treni prevedibili, la variazione di alcuni parametri può portare a vantaggi in termini di stabilità dell'orario, riducendo il tempo di occupazione dell'infrastruttura. Lo si può osservare nel grafico seguente, dove sono state riportate le percentuali di occupazione dell'infrastruttura riferite al numero di treni originariamente previsti nell'orario.

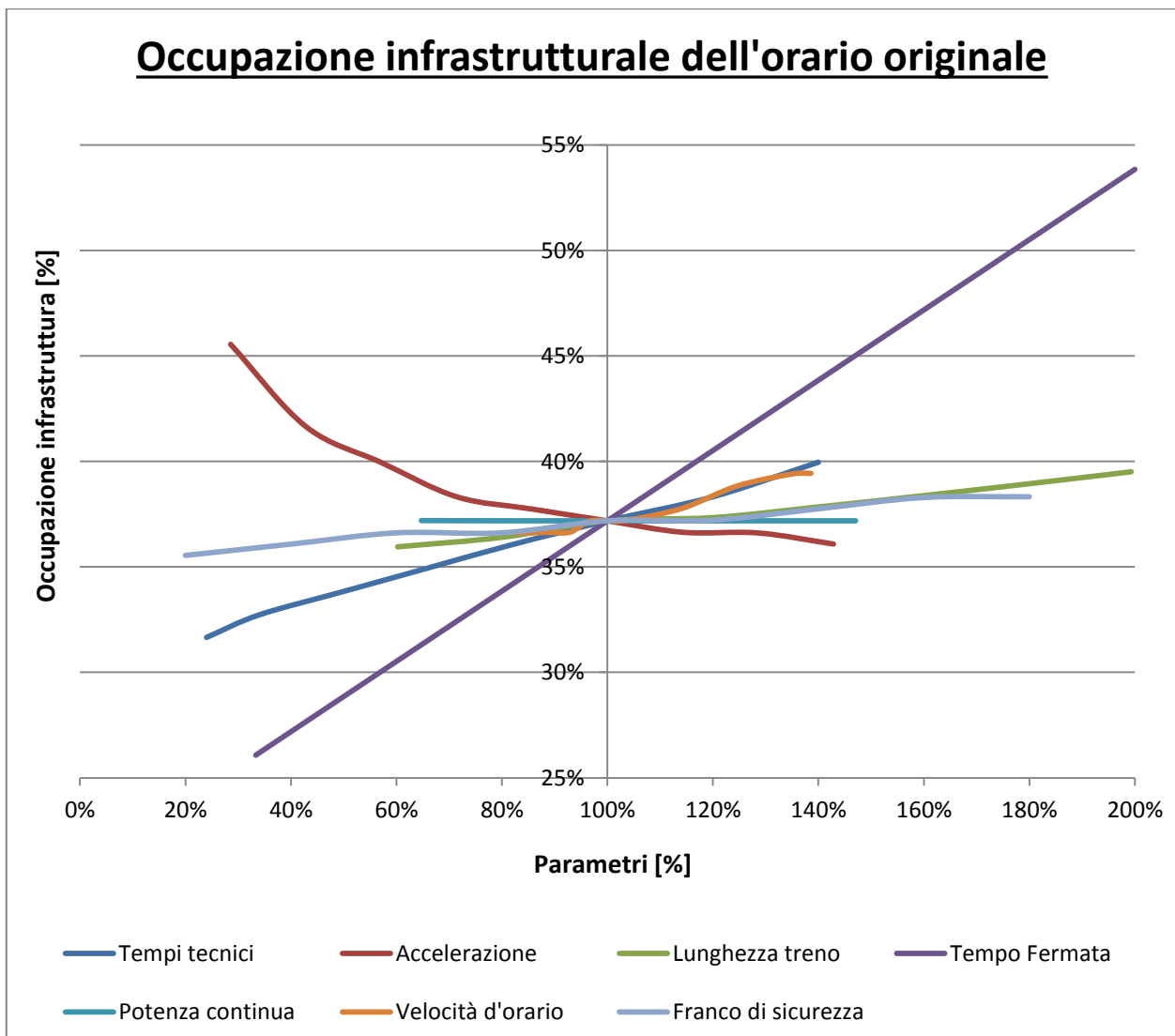


Grafico 7.1.17: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea suburbana – Blocco Mobile

Anche i parametri che non danno variazione di capacità offrono comunque un contributo alla variazione di occupazione dell'infrastruttura, anche se in modo ridotto rispetto ai parametri maggiormente incidenti sulla potenzialità della linea. Questo a significare che nessuno dei parametri considerati, ad eccezione della potenza continuata, è effettivamente influente nella determinazione della capacità.

7.1.3 Confronto

Dall'analisi dei risultati ottenuti si nota che la potenzialità della linea suburbana cresce con il miglioramento del livello tecnologico del segnalamento e al passare dal distanziamento a Blocco Fisso a quello a Blocco Mobile.

Il risultato principale dello studio della linea suburbana consiste nell'aver determinato che l'elemento con la maggior influenza sulla capacità è la fermata. Non essendo previste manovre di precedenza in stazione, in quanto non sono presenti binari deviati, l'inserimento di fermate nell'orario determina l'impossibilità di un efficiente accostamento delle tracce nel diagramma tempo/spazio (vedere allegati A.3 ed A.4). Si generano inevitabilmente dei vuoti nel diagramma compattato, i quali non possono essere utilizzati per far viaggiare dei treni, e che di conseguenza determinano un'occupazione di infrastruttura. Maggiori sono la lunghezza delle sezioni in cui avviene la fermata e la durata delle fermate, maggiori sono le perdite di capacità da esse causate. Questo vale per entrambi i tipi di distanziamento.

Si vuole ora studiare ciò che differenzia le potenzialità tra i due sistemi. Si ha che dalle analisi effettuate, il distanziamento a Blocco Mobile risulta maggiormente vantaggioso sul Fisso. In particolare se si sfrutta al 100% la capacità della linea, l'incremento del numero di treni che si otterrebbe passando dal sistema di base a Blocco Fisso all'omologo a Blocco Mobile sarebbe del 22%.

Si riportano di seguito i confronti relativi alle voci in comune tra i due sistemi di distanziamento (accelerazione, lunghezza treno, ecc.). Per i parametri *lunghezza delle sezioni di blocco* e *franco di sicurezza* non può essere eseguito un raffronto in quanto i due parametri non hanno un corrispondente nell'opposto sistema di distanziamento.

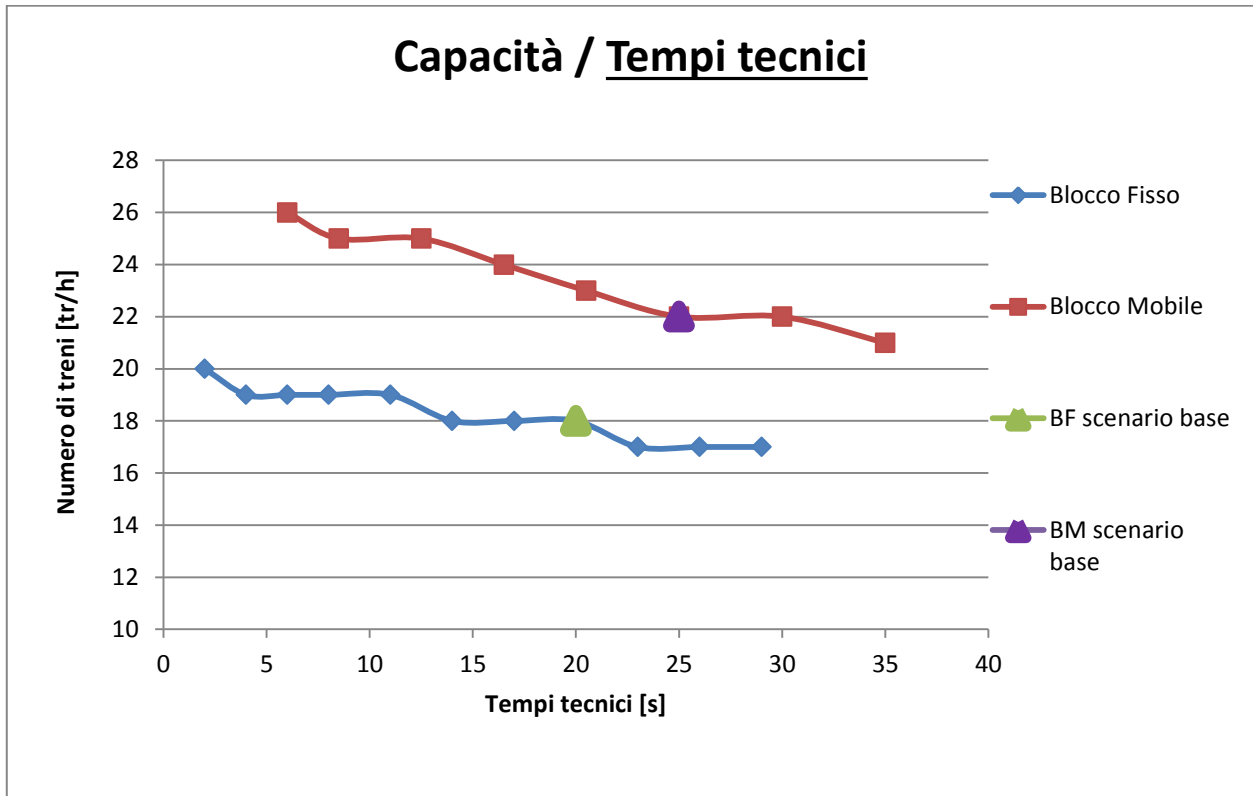


Grafico 7.1.18: Confronto al variare dei tempi tecnici - linea suburbana

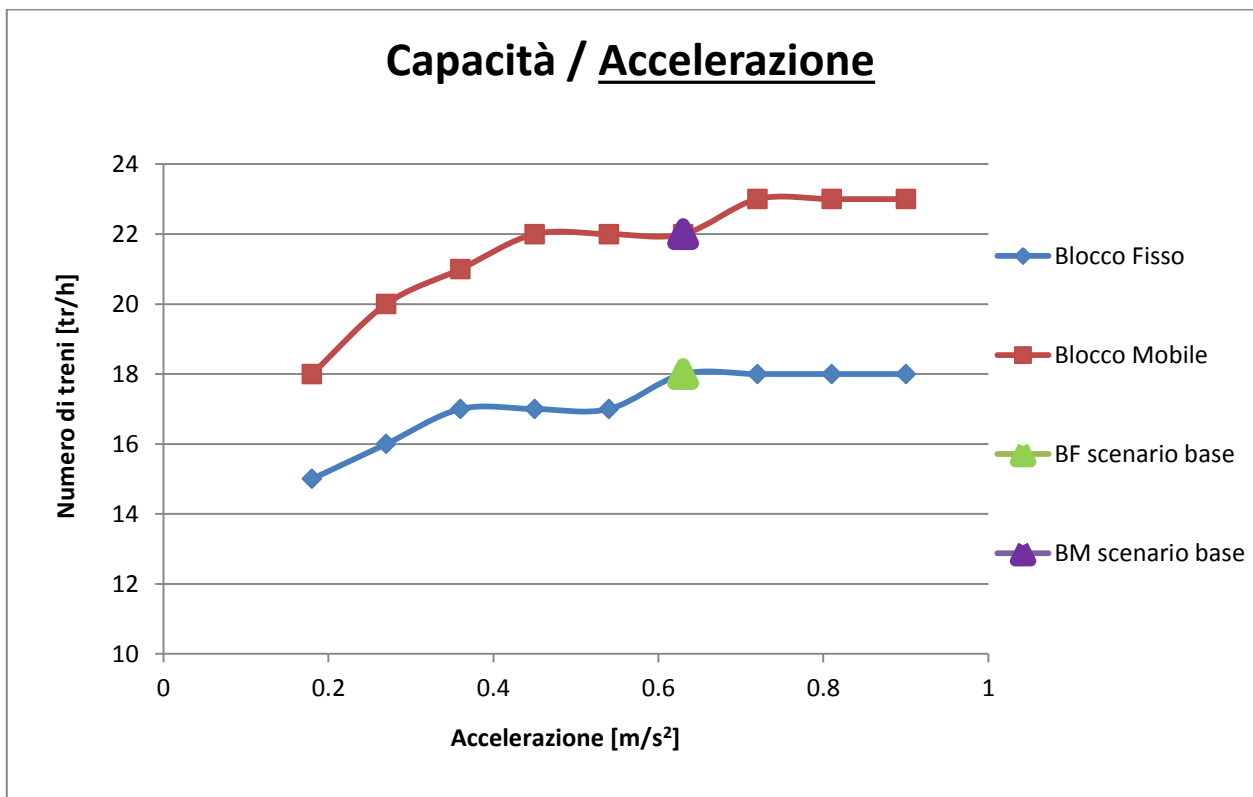


Grafico 7.1.19: Confronto al variare dell'accelerazione di servizio - linea suburbana

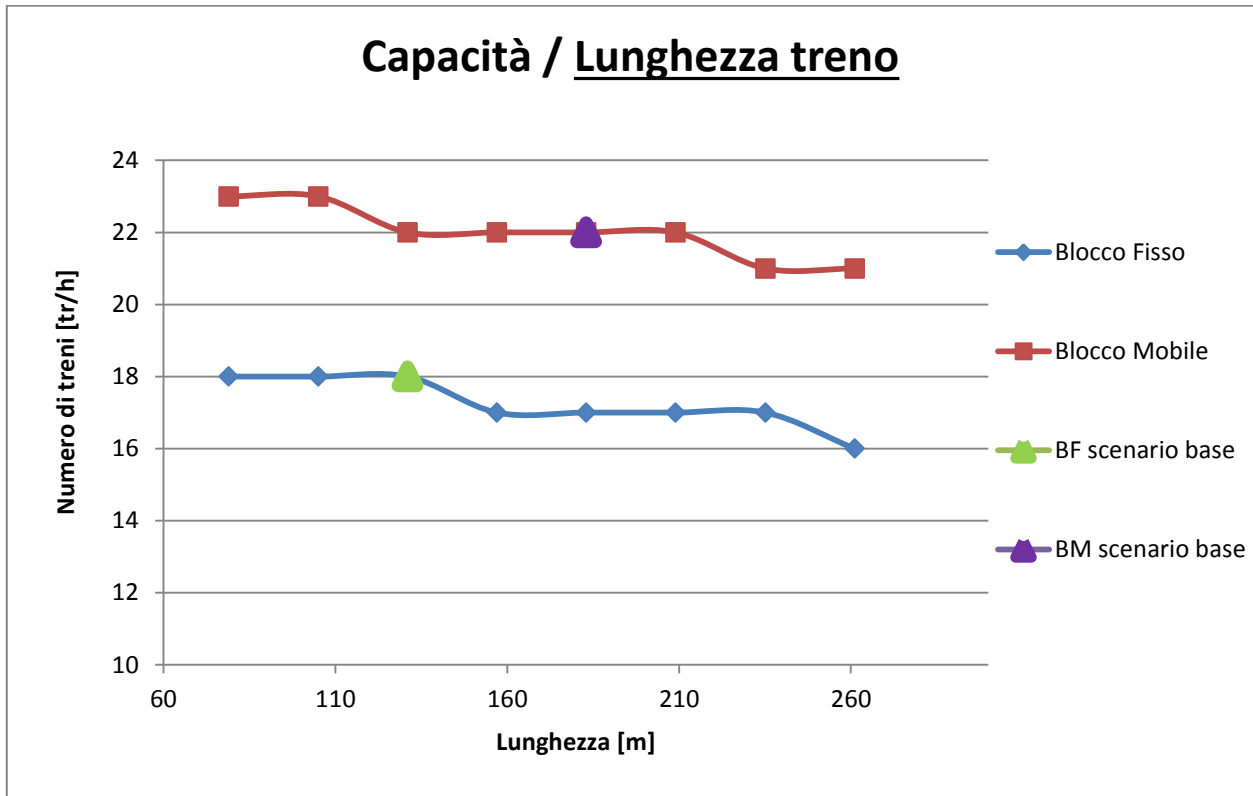


Grafico 7.1.20: Confronto al variare della lunghezza del treno - linea suburbana

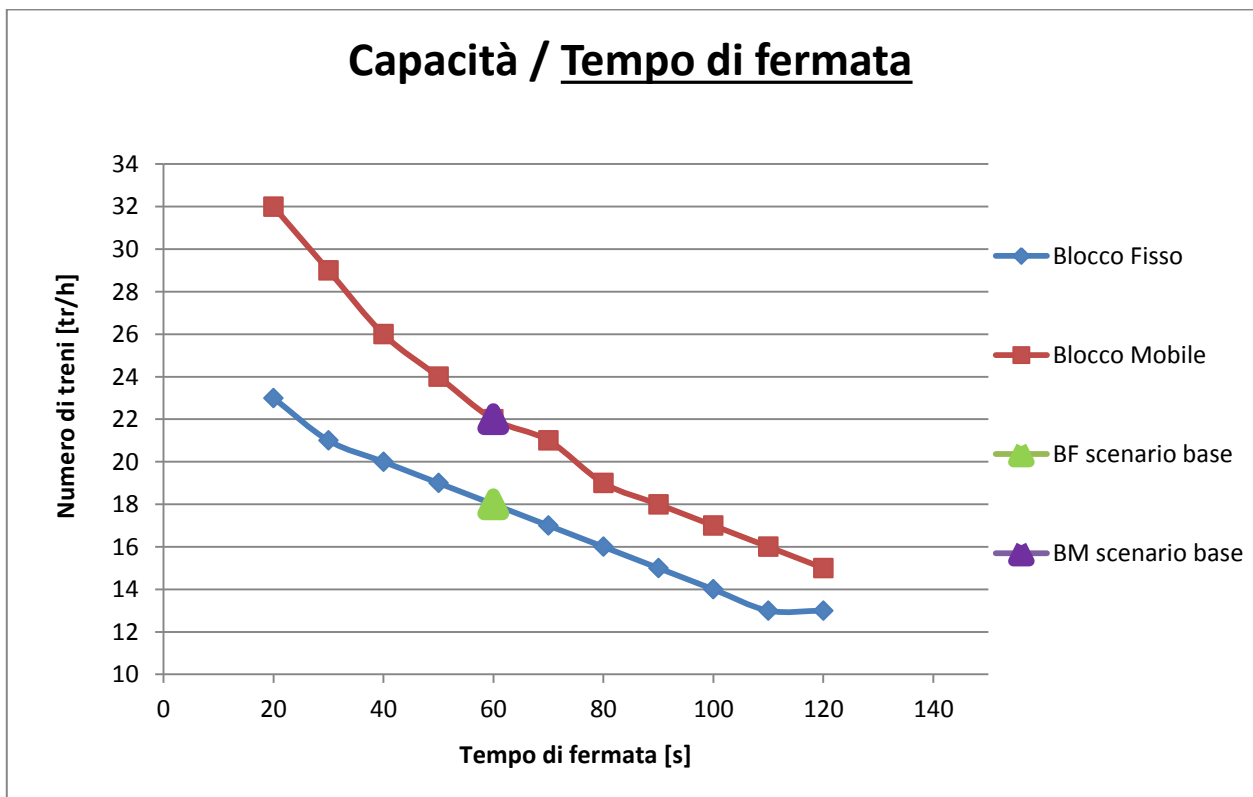


Grafico 7.1.21: Confronto al variare del tempo di fermata - linea suburbana

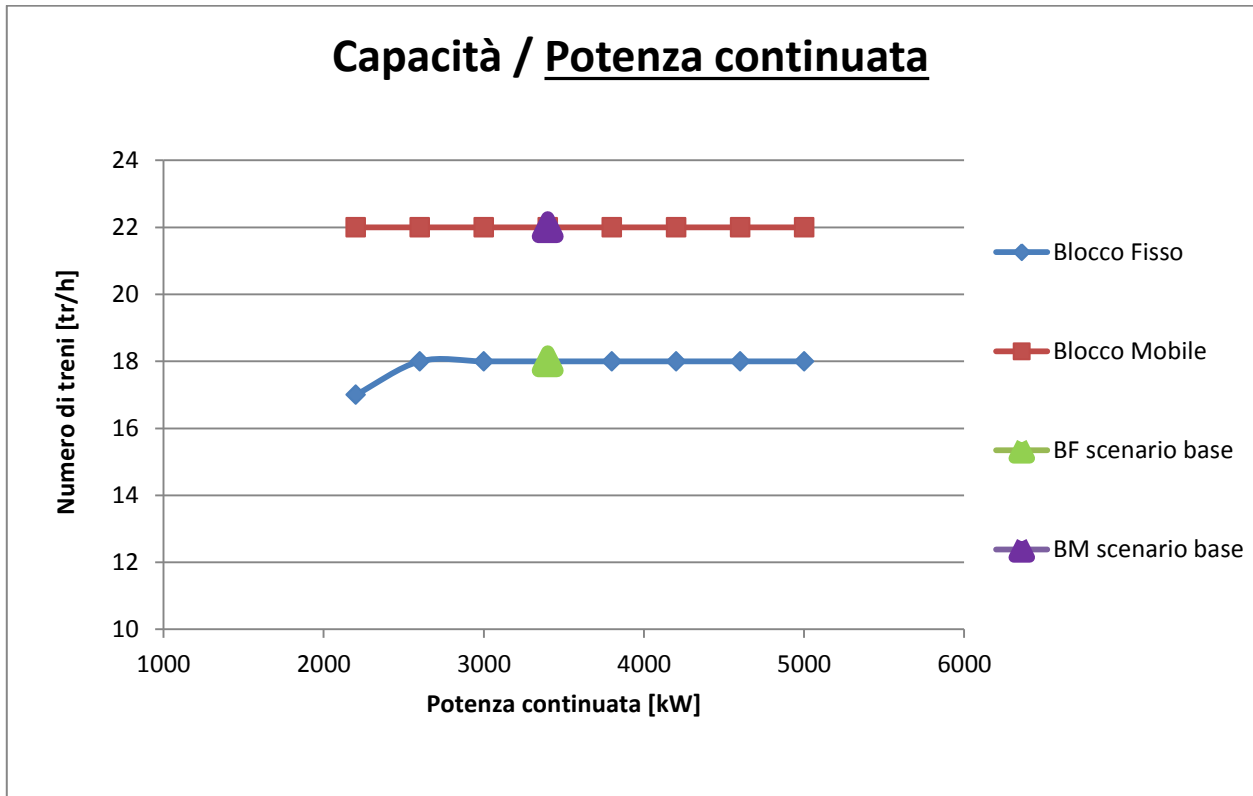


Grafico 7.1.22: Confronto al variare della potenza continuata - linea suburbana

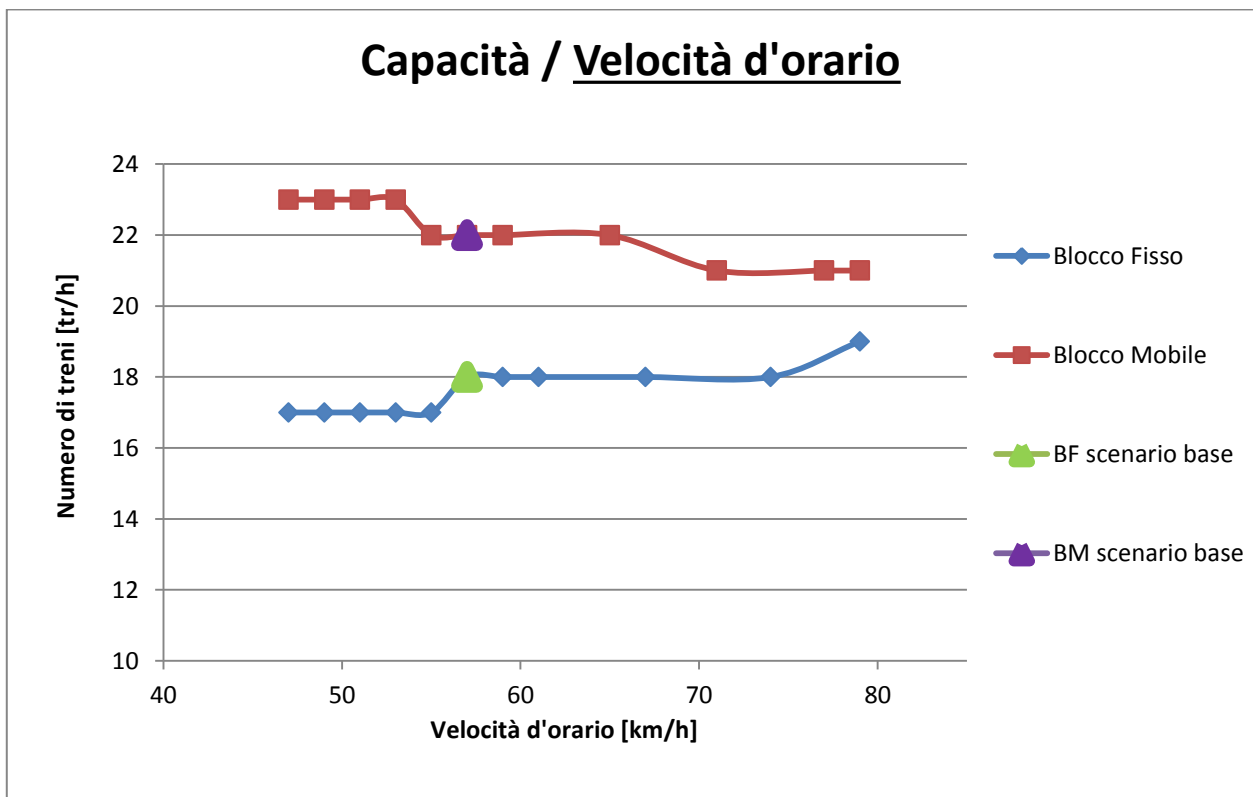


Grafico 7.1.23: Confronto al variare della velocità d'orario - linea suburbana

Dall'osservazione dei grafici precedenti si può confermare il risultato principale di questo studio della capacità: essa è influenzata principalmente dalla fermata.

Per quanto riguarda il Blocco Fisso, le sezioni critiche della linea sono i blocchi all'interno di cui i treni effettuano le fermate. Infatti, il ramo di decelerazione, il tempo di fermata e il ramo di accelerazione determinano un tempo di occupazione molto più elevato rispetto a quello calcolato con la velocità di tracciato di 60 km/h.

I tempi tecnici ricoprono un ruolo decisivo perché si applicano a ciascuna traccia e sommandosi raggiungono una percentuale importante del tempo di occupazione di infrastruttura, a causa dell'elevato numero di treni circolanti.

Per quanto riguarda la tecnica di distanziamento del Blocco Mobile possiamo affermare, come nel caso precedente, che il collo di bottiglia dell'infrastruttura è rappresentato dalle fermate, dato che i treni non possono sorpassarsi. Il sostanzioso incremento di capacità della linea è dovuto al fatto che con il Blocco Mobile il distanziamento è minore rispetto al Blocco Fisso. Infatti, in quest'ultimo caso, affinché i treni abbiano via libera, devono esserci almeno due sezioni di blocco libera tra due treni successivi.

Questa è solo una situazione ideale. In realtà bisogna considerare:

- l'uscita della coda del treno precedente dalla sezione di blocco occupata;
- un certo tempo di anticipo dalla comparsa del verde rispetto all'istante in cui il treno transita;
- un tempo tecnico necessario alla tecnologia per rilevare la liberazione/occupazione della sezione di blocco e trasmissione dell'informazione.

Pertanto in linea i treni viaggiano ad una distanza superiore a 2 sezioni di blocco (come già mostrato nella Figura 2.1.3).

Nel Blocco Mobile invece il distanziamento è pari alla distanza di frenatura più la lunghezza del treno e lo spazio percorso in un tempo pari ai tempi tecnici. Ne consegue che i treni viaggiano con poco più di quello che sarebbe una sezione di blocco (se essa è circa pari alla distanza di arresto), circa la metà rispetto al caso precedente (Figura 2.2.1). Questo giustifica l'incremento di treni inseribili nell'orario.

7.1.4 Potenziamento del Blocco Fisso

Ipotizzando di poter modificare i parametri analizzati nel distanziamento a Blocco Fisso, è interessante capire se tale sistema sia in grado di raggiungere la capacità di quello a Blocco Mobile del caso di base. In altre parole si vuole vedere se, migliorando le caratteristiche tecniche del distanziamento a Blocco Fisso e le prestazioni del materiale rotabile, si è in grado di raggiungere la stessa potenzialità che la linea ha con il distanziamento a Blocco Mobile.

Si sono effettuate due prove:

- **Caso 1:** miglioramento dei parametri meccanici del materiale rotabile;
- **Caso 2:** miglioramento dei parametri propri del distanziamento e della linea e dell'accessibilità delle vetture.

Nel primo caso si è proceduto al contemporaneo incremento a step di 10% di velocità d'orario, potenza continuata e accelerazione. Il grafico seguente sintetizza i risultati ottenuti dal programma di calcolo.

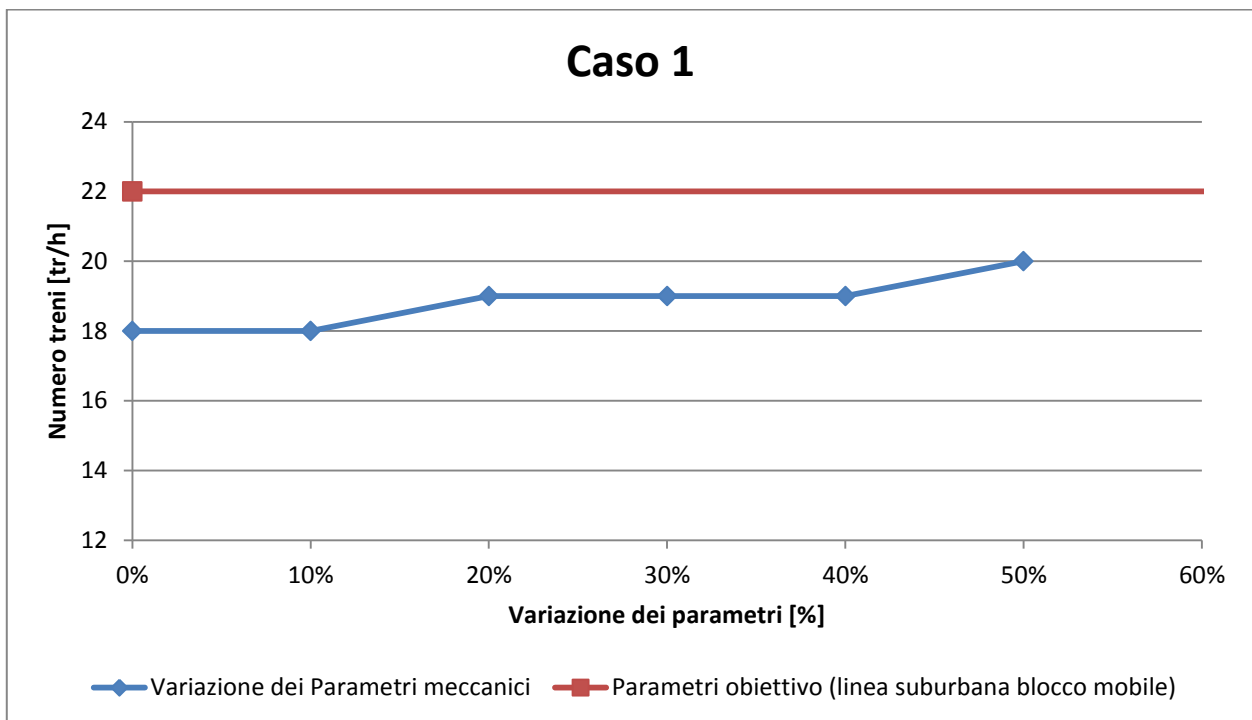


Grafico 7.1.24: Variazione di capacità con il miglioramento dei parametri meccanici del materiale rotabile nel Blocco Fisso

Nemmeno con un incremento di questi parametri pari al 50% è possibile garantire la capacità di 22 treni/ora offerta dal caso base del Blocco Mobile. Al limite si potrebbero far circolare 20 treni/ora.

Nel secondo caso sono stati fatti diminuire fino al 50% i seguenti parametri: tempi tecnici, lunghezza delle sezioni di blocco e tempo di fermata. I risultati ottenuti sono i seguenti.

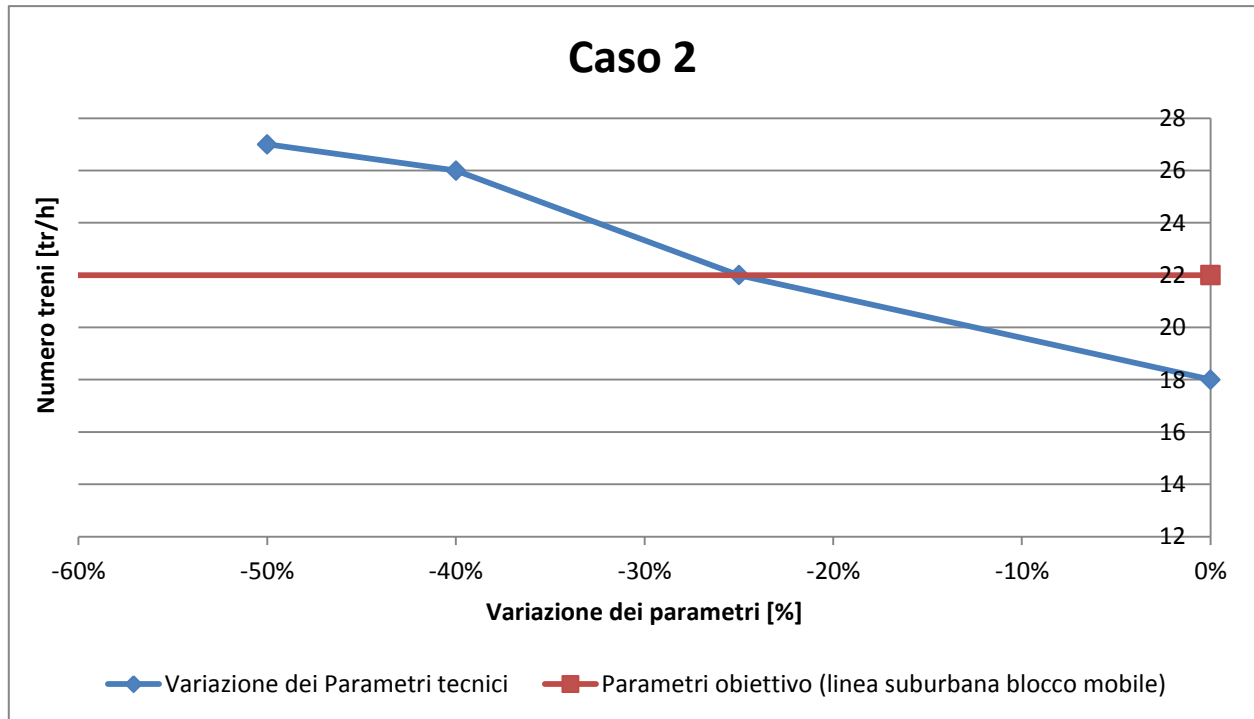


Grafico 7.1.25: Varzione di capacità con il diminuire dei parametri propri del distanziamento a Blocco Fisso

Già con una riduzione del 25% si otterrebbero pari prestazioni della linea, mentre con ulteriori decrementi si potrebbe superare la potenzialità offerta dal caso base di Blocco Mobile.

Questo era prevedibile, ed è in maggior luogo dovuto alla variazione della durata delle fermate. Infatti se si guardano i vari grafici di confronto precedenti (paragrafo 7.1.3), si nota che l'unico nel quale le due curve di capacità hanno delle zone di massimo numero di treni in comune è quello dove si confronta la capacità al variare dei tempi di fermata (Grafico 7.1.21). In particolare si osserva come la capacità compresa tra 15 e 23 treni/ora viene raggiunta da entrambi i sistemi di distanziamento, ma per tempi di fermata differenti (minori nel caso di Blocco Fisso).

In tutti gli altri grafici si vede come non accade mai che nella migliore delle prospettive di Blocco Fisso si raggiunga la peggiore prospettiva di Blocco Mobile.

7.2 Linea ad Alta Velocità

E' stata considerata come linea di riferimento la seguente linea ideale, le cui caratteristiche sono esposte nella tabella sottostante.

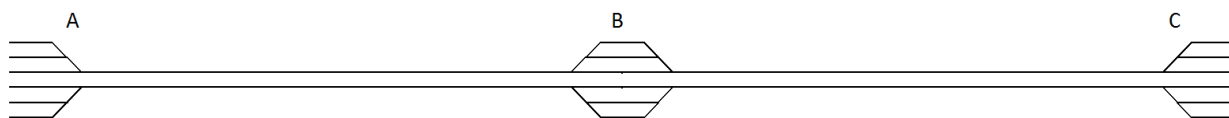


Figura 7.2.1: Schematizzazione della linea ad Alta Velocità

Velocità di tracciato	350 km/h
Velocità d'orario	315 km/h
Lunghezza delle sezioni di blocco	1'800 m
Lunghezza delle banchine	400 m
Distanza tra due stazioni	180 km
Estensione della linea	363,2 km
Tipologie di treni circolanti	ETR 500

Tabella 7.2.1: Caratteristiche della linea ad Alta Velocità

Per questo scenario è stata scelta una finestra temporale di due ore come rappresentativa del traffico ferroviario nel periodo di punta. Tale scelta si addice alla lunghezza della linea.

Nell'orario di base sono stati previsti 4 treni/ora, con un conseguente distanziamento di 15 minuti nella stazione di partenza. I treni effettuano la fermata nella stazione intermedia e inoltre, essendo tutti dello stesso tipo, seguono la medesima curva di accelerazione e di frenatura.

Le linee ad alta velocità gestite con distanziamento a Blocco Fisso, solitamente vengono meno alla corrispondenza tra lunghezza della sezione di blocco e distanza di arresto alla massima velocità. Infatti per velocità di 300 km/h ad esempio, occorrerebbero sezioni di blocco lunghe circa 5 km. Ciò tuttavia causerebbe un'occupazione eccessiva dell'infrastruttura. Si adotta quindi una suddivisione della linea in porzioni più corte, che possano essere liberate più velocemente, ma occorre prevedere un distanziamento superiore alla singola sezione di blocco.

7.2.1 Blocco Fisso

Il Blocco Fisso considerato nel caso di base prevede sezioni di blocco da 1'800 m. Perché esse siano compatibili con elevate velocità, il sistema di distanziamento prevede sezioni concatenate; in questo modo le sezioni libere tra un treno ed il successivo variano a seconda della velocità. Con la tipologia di treni considerati, non sarebbe infatti possibile l'arresto del treno all'interno di un'unica sezione per velocità superiori a circa 190 km/h. Essendo richiesto il raggiungimento di velocità ben più elevate (oltre i 300 km/h), occorre regolamentare il distanziamento minimo in funzione della velocità del treno. Si è quindi scelto di attribuire un limite di velocità in funzione delle sezioni libere disponibili. Quando un treno entra in una sezione di blocco, esso dovrà regolare la velocità in funzione del numero di sezioni libere antistanti in modo che sia possibile il completo arresto entro l'ultima sezione disponibile. I limiti adottati nel presente lavoro sono i seguenti.

Sezioni libere	Limite di velocità [km/h]
1	50
2	110
3	180
4	250
5	300
6	340

Tabella 7.2.2: Limiti di velocità - Linea AV

I limiti assunti fino a tre sezioni di blocco libere corrispondono alle norme relative al sistema di ripetizione dei segnali adottato sulle reti italiane. Da quattro sezioni in su, invece, i limiti differiscono in quanto le prescrizioni contenute nelle NEAT sono riferite a sezioni di blocco da 1'350 m, tipiche delle linee tradizionali (in cui la velocità massima permessa è 250 km/h). Si è comunque verificato che i limiti adottati nel presente lavoro fossero conformi allo spazio libero disponibile e alle caratteristiche meccaniche considerate.

Questo tipo di distanziamento può essere rappresentativo di una linea ferroviaria predisposta per lo standard ERTMS L2 oppure con la ripetizione in macchina dei segnali. Nel primo caso il treno riceve un'Autorizzazione al Movimento da parte del Radio Block Center che gli fornisce la velocità obiettivo relativa alla sezione di blocco in cui si trova il treno [2], nel secondo caso l'informazione proviene dal captatore del treno stesso, sulla base del codice presente nei circuiti di binario [3] (il codice varia al variare delle sezioni libere). Ad ogni modo, al treno viene fornito un limite di

velocità relativo allo spazio libero antistante. Qualora il treno varchi una sezione di blocco con una velocità superiore a quella consentita, il macchinista dovrà rallentare per adeguare la velocità al limite. Nel caso non lo facesse, è in generale sempre presente nei sistemi adottati una frenatura di emergenza, che, sulle reti italiane, dà tre secondi di tempo al macchinista per riconoscere il limite di velocità (quando esso è più restrittivo del precedente).

Inoltre, si è assunto che un treno che deve fermarsi in stazione si comporti come se la sezione di blocco successiva alla stazione sia occupata. Pertanto il treno, avvicinandosi alla stazione, riceve un limite di velocità via via inferiore a partire dalla quarta sezione di blocco precedente la stazione come mostrato in:

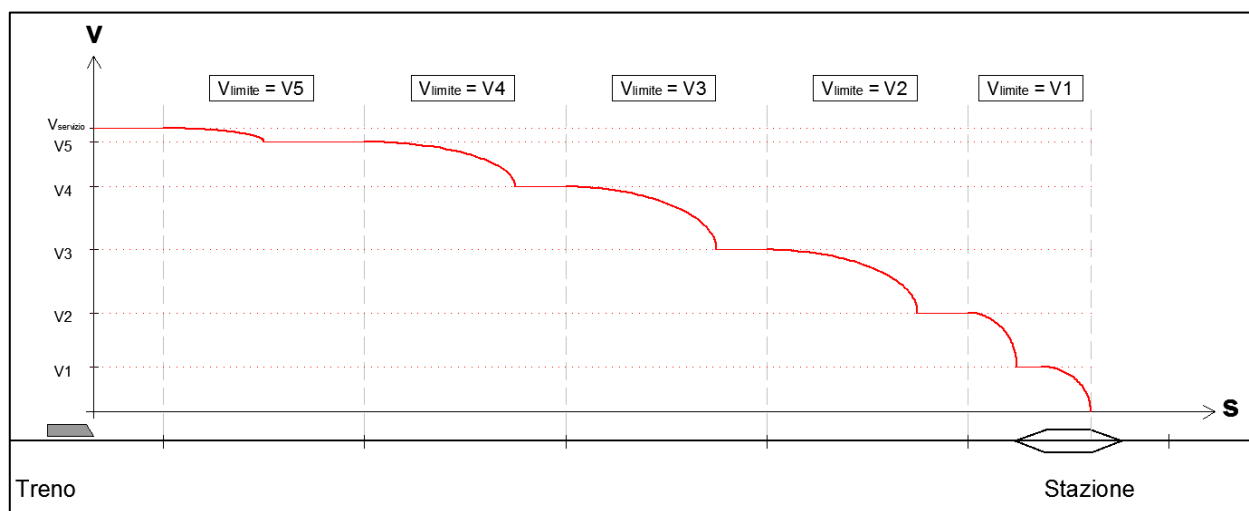


Figura 7.2.2: Step di decelerazione - linea AV - Blocco Fisso

I codici di calcolo utilizzati nel presente paragrafo fanno riferimento agli algoritmi di Figura 6.2.2, Figura 6.3.1, Figura 6.4.1 e Figura 6.4.2.

7.2.1.1 Situazione attuale

Lo scenario base indicativo della situazione attuale prende spunto dalle linee AV/AC di recente realizzate in Italia. Di conseguenza, come tempi tecnici, ci si è basati su quelli propri del Livello 2 dell'ERTMS/ETCS [17]. L'entità di tali parametri nello scenario base è indicata nella seguente tabella.

Tempo per la trasmissione dei dati tra interlocking e RBC [s]	4
Tempo di elaborazione del RBC [s]	6
Tempo per la trasmissione dei dati tra RBC e treno [s]	6

Tempo di elaborazione del computer di bordo [s]	4
<i>Tempo tecnico totale [s]</i>	20

Tabella 7.2.3: Tempi tecnici – linea AV – Blocco Fisso

In questo caso i tempi tecnici sono costituiti dal tempo di rilevamento e trasmissione dati di occupazione della sezione di blocco, elaborazione delle informazioni, trasmissione delle informazioni a bordo del treno ed elaborazione delle informazioni a bordo del treno. Non è stato considerato il tempo di reazione del macchinista poiché esso non influisce sul minimo distanziamento a marcia indisturbata: il macchinista ha tre secondi di tempo, una volta ricevuto un limite di velocità più restrittivo, per riconoscere la prescrizione.

Dall'analisi dell'orario grafico originale e procedendo con il processo di compressione, si è pervenuti ai seguenti risultati:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	26.1
Tempo di sicurezza [min]	8.7
Capacità inutilizzata [min]	85.2
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	21.7%
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	7.2%
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	71.1%
Treni nella finestra temporale	8
Velocità media delle tracce [km/h]	272
Consumo di capacità [%]	28.9%
Stabilità	71.1%
Eterogeneità	0.0%

Tabella 7.2.4: Risultati della compressione dell'orario originale – linea AV – Blocco Fisso

Dall'analisi è stato ricavato innanzitutto il tempo di occupazione dell'infrastruttura (26.1 min) nell'arco della finestra temporale. L'UIC, per linee ad Alta Velocità nell'ora di picco, consiglia un tetto massimo di occupazione dell'infrastruttura pari al 75% della finestra temporale considerata, si deduce che è ritenuto sufficiente un margine pari al 25%. Sulla base di queste indicazioni dell'UIC, si è deciso di mantenere, nelle nostre analisi, lo stesso rapporto tra tempo di occupazione e margini. Pertanto, essendo l'occupazione di infrastruttura pari in questo caso al 22% della finestra di tempo, si riservano margini pari al 7%, ne consegue che il 71% di tempo residuo consista in capacità inutilizzata. Di seguito verrà portato a termine il metodo di compattazione

esposto nell'UIC CODE 406 inserendo nuovi treni fino a massima saturazione possibile della capacità inutilizzata.

Procedendo con la compressione dell'orario grafico si nota la possibilità di inserire ulteriori tracce orario. Arrivando alla saturazione dell'orario, si sono ottenuti i seguenti valori:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	88
Tempo di sicurezza [min]	29.3
Capacità inutilizzata [min]	2.6
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	73.3%
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	24.4%
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	2.2%
Treni nella finestra temporale	27
Velocità media delle tracce [km/h]	272
Consumo di capacità [%]	97.7%
Stabilità	26.6%
Eterogeneità	0.0%

Tabella 7.2.5: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea AV – Blocco Fisso

Dalla compressione dell'orario si nota come è possibile aumentare il numero di treni/ora previsti dall'orario originale. In particolare potrebbero essere inseriti nell'orario 19 treni aggiuntivi, garantendo comunque i margini previsti dall'UIC.

Nella Tabella 7.2.6 si riporta l'elenco di parametri che sono stati fatti variare per osservare quali hanno una maggiore o minore influenza sulla capacità intesa come numero massimo di treni/ora prevedibili. Ad essi viene affiancato il loro valore nel caso di base.

Tempi tecnici [s]	20
Accelerazione di servizio [m/s^2]	0.54
Lunghezza del treno [m]	328
Tempo di fermata in stazione [s]	180
Potenza del treno [kW]	8'800
Massima velocità di servizio [km/h]	315

Tabella 7.2.6: Parametri considerati e loro valore nel caso di base – linea AV – Blocco Fisso

Di seguito si analizzano i risultati di capacità al variare dei parametri considerati.

7.2.1.2 Tempi tecnici

Nello scenario attuale si ha un totale di tempi tecnici di 20 s. Dal momento che le tecnologie utilizzate in ambito ferroviario permettono sia un utilizzo più cautelativo delle stesse, sia scenari più estremi data la probabile evoluzione tecnologica, l'ammontare dei tempi tecnici è stato fatto variare all'interno di un ampio range di valori.

Eseguendo il metodo di compattazione per i diversi tempi tecnici considerati (mantenendo invariati gli altri parametri), si ottengono i seguenti risultati. Con la sigla **T/O** si indica il numero di treni/ora, con **T.O.I.** il tempo di occupazione dell'infrastruttura, con **T.S.** il tempo di sicurezza e con **C.I.** la capacità inutilizzata.

Tempi tecnici [s]	0	5	10	15	20	25	30	35	40
T/O	30	29	29	28	27	26	26	25	25
T.O.I. [min]	87.8	87.3	89.7	88.9	88.0	86.9	89.1	87.7	89.8
T.S. [min]	29.3	29.1	29.9	29.6	29.3	29.0	29.7	29.2	29.9
C.I. [min]	2.9	3.6	0.4	1.4	2.6	4.1	1.2	3.0	0.2
% T.O.I. [%]	73.2%	72.7%	74.7%	74.1%	73.3%	72.4%	74.2%	73.1%	74.9%
% T.S. [%]	24.4%	24.2%	24.9%	24.7%	24.4%	24.1%	24.7%	24.4%	25.0%
% C.I. [%]	2.5%	3.0%	0.3%	1.2%	2.2%	3.4%	1.0%	2.5%	0.2%

Tabella 7.2.7: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea AV - Blocco Fisso

In questo grafico si rappresenta il legame tra i tempi tecnici ed il massimo numero di treni prevedibili nell'orario.

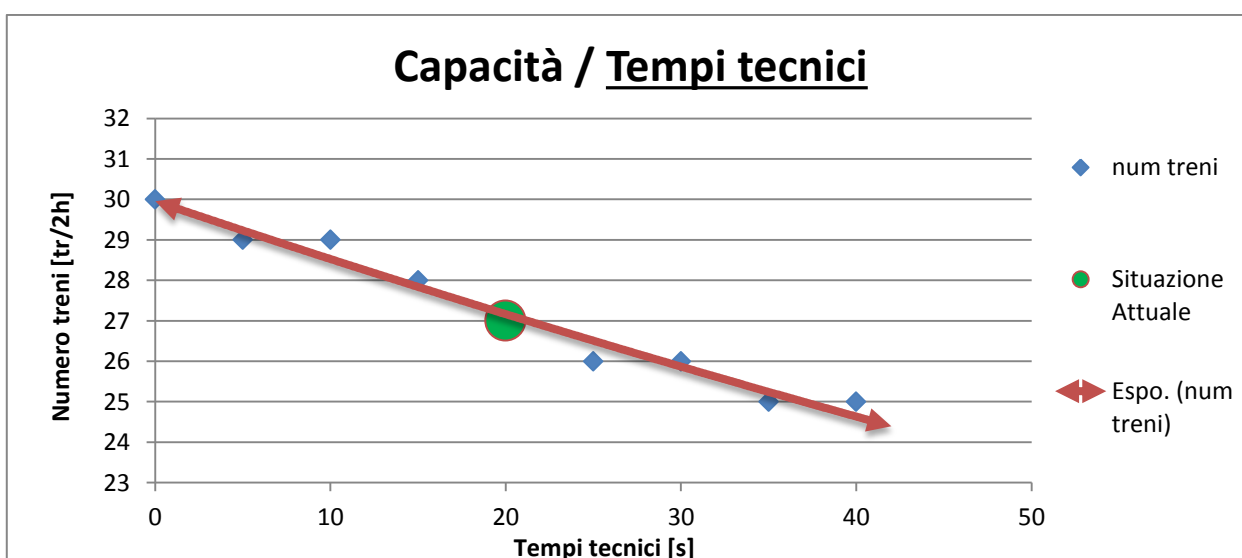


Grafico 7.2.1: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso

Come già osservato sulla linea suburbana, all'aumentare dei tempi tecnici diminuisce la capacità della linea, poiché aumenta l'occupazione di infrastruttura del singolo treno.

Con tempi tecnici nulli si potrebbero prevedere fino a 30 treni/2ore, mentre si scende a 25 treni/2ore con tempi tecnici di 40 s.

7.2.1.3 Accelerazione di servizio

Nello scenario attuale si è considerata un'accelerazione di servizio pari al 60% di quella massima prevista, pari a 0.9 m/s^2 . Si è deciso di effettuare delle prove anche con valori maggiori del limite massimo considerato nel caso di base.

% acc. di servizio	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%
Acc. di servizio [m/s ²]	<u>0.09</u>	<u>0.18</u>	<u>0.27</u>	<u>0.36</u>	<u>0.45</u>	<u>0.54</u>	<u>0.63</u>	<u>0.72</u>	<u>0.81</u>	<u>0.9</u>	<u>0.99</u>	<u>1.08</u>	<u>1.17</u>	<u>1.26</u>
T/20	20	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
T.O.I. [min]	87.6	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0
T.S. [min]	29.2	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3
C.I. [min]	3.2	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
% T.O.I. [%]	73.0%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%
% T.S. [%]	24.3%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%
% C.I. [%]	2.7%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%

Tabella 7.2.8: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea AV - Blocco Fisso

Di seguito si può osservare il legame tra accelerazione e capacità

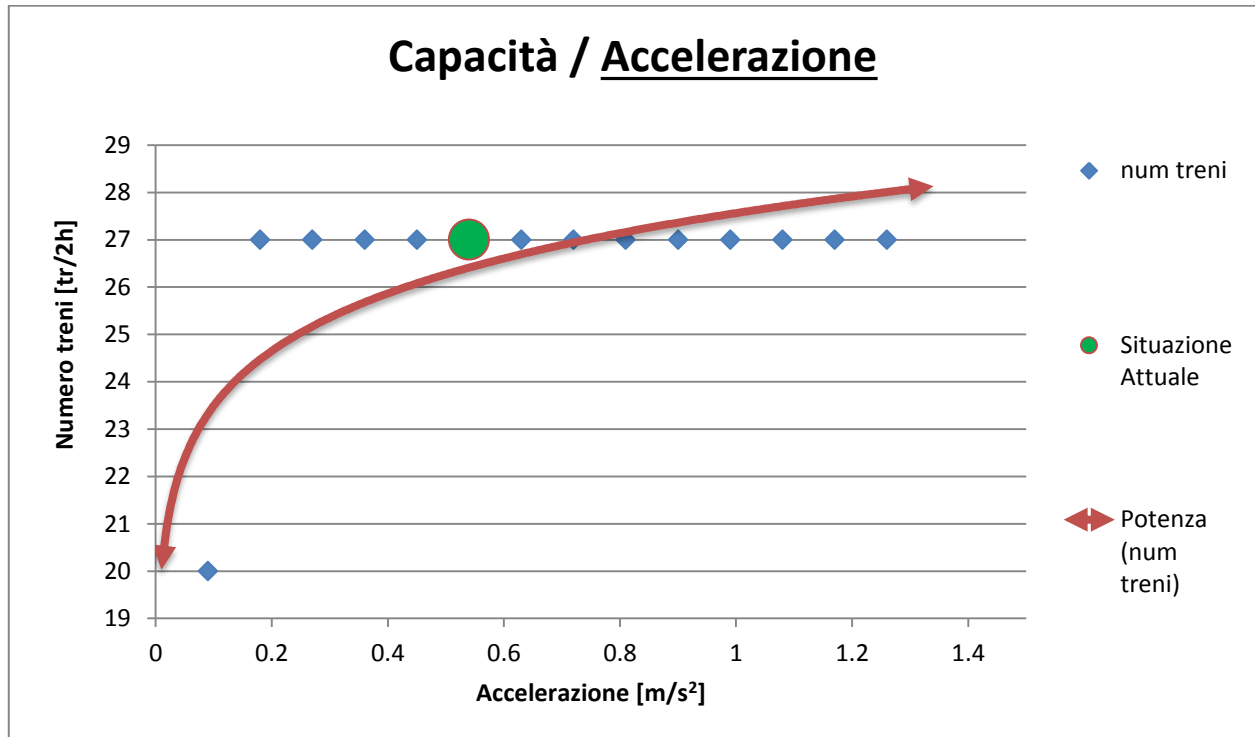


Grafico 7.2.2: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso

La capacità risulta crescente con l'accelerazione di servizio nell'intervallo di valori studiato, tuttavia il legame non è lineare. In particolare si osserva che, a meno di considerare accelerazioni di servizio molto basse, il numero di treni/2ore ed il tempo di occupazione di infrastruttura rimangono invariati. Ciò è in parte dovuto al fatto che la sezione di blocco critica è quella antecedente la stazione, dove avviene l'ultimo tratto di frenatura. Infatti l'occupazione di tale sezione comincia quando il treno entra (ad una velocità compresa tra V_5 e V_6) nella sestultima sezione. Invece, la sezione successiva alla stazione è quella che, relativamente al tratto di accelerazione, ha un tempo di occupazione maggiore; anche riducendo l'accelerazione, il suo tempo di occupazione rimane inferiore a quello della sezione precedente la stazione fino ad accelerazioni di $0.18 m/s^2$.

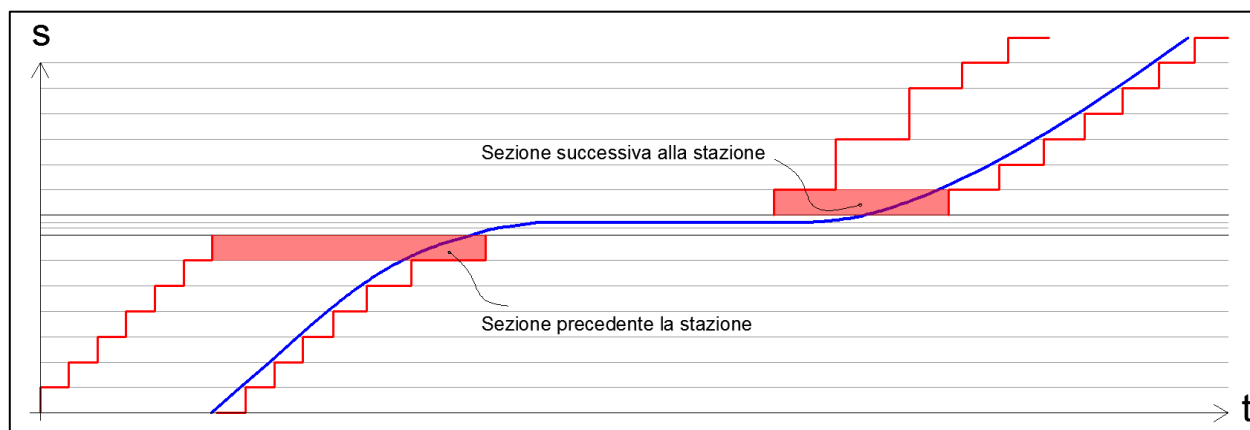


Figura 7.2.3: Dettaglio dei tempi di occupazione delle sezioni prossime alla stazione - linea AV - Blocco Fisso

Tuttavia, la causa preponderante che porta all'assenza di miglioramento della capacità è il rispetto del limite di aderenza ruota-rotaia. Si è visto che, per accelerazioni maggiori di 0.54 m/s^2 , la Forza di Trazione eccederebbe quella di Aderenza; pertanto l'accelerazione non può superare il 60% di quella massima considerata.

7.2.1.4 Lunghezza del treno

Come nei casi precedenti, nelle linee reali possono circolare treni con diverse composizioni e lunghezze, pertanto si considerano ulteriori possibilità. Dato che sono state previste banchine lunghe 400 metri, questo costituisce un limite massimo per la lunghezza dei treni.

N° di carrozze passeggeri	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Lunghezza del treno [m]	<u>119</u>	<u>145</u>	<u>171</u>	<u>197</u>	<u>223</u>	<u>249</u>	<u>275</u>	<u>302</u>	328	<u>354</u>	<u>380</u>
Massa in servizio [t]	<u>276</u>	<u>322</u>	<u>369</u>	<u>415</u>	<u>465</u>	<u>508</u>	<u>555</u>	<u>601</u>	648	<u>694</u>	<u>741</u>
T/20	28	28	28	28	28	27	27	27	27	27	27
T.O.I. [min]	88.1	88.5	88.9	89.3	89.7	86.9	87.2	87.6	88.0	88.4	88.8
T.S. [min]	29.4	29.5	29.6	29.8	29.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.5	29.6
C.I. [min]	2.6	2.0	1.5	1.0	0.4	4.2	3.7	3.2	2.6	2.1	1.6
% T.O.I. [%]	73.4%	73.7%	74.1%	74.4%	74.7%	72.4%	72.7%	73.0%	73.3%	73.7%	74.0%
% T.S. [%]	24.5%	24.6%	24.7%	24.8%	24.9%	24.1%	24.2%	24.3%	24.4%	24.6%	24.7%
% C.I. [%]	2.1%	1.7%	1.2%	0.8%	0.4%	3.5%	3.1%	2.6%	2.2%	1.8%	1.4%

Tabella 7.2.9: Risultati al variare della lunghezza del treno - linea AV - Blocco Fisso

La rappresentazione grafica è la seguente.

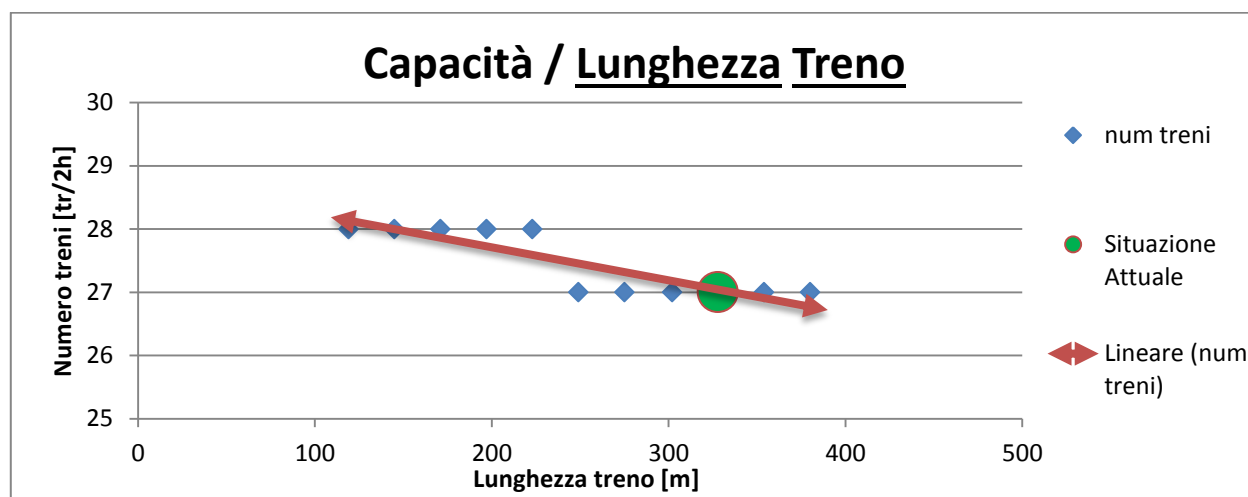


Grafico 7.2.3: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso

Questo parametro ha una scarsa incidenza in quanto, nel calcolo della capacità, interviene principalmente nel tempo di liberazione, che è sempre esiguo rispetto al tempo di percorrenza della sezione e del tempo di approccio, che rimangono invariati. Pertanto tra i due casi estremi considerati (treno lungo 119 metri e treno lungo 380 metri) la variazione è soltanto di 1 treno/2ore.

Un effetto secondario della diminuzione della lunghezza del treno è la riduzione di peso che permette di mantenere l'accelerazione di servizio per velocità più elevate. Questo si verifica perché la potenza, in questa tipologia di treni, è concentrata nei locomotori e quindi costante al variare della lunghezza. Ciò comporta una riduzione del tempo di percorrenza della tratta, tuttavia non si tratta di un guadagno sostanziale in quanto, tenuto conto che il tempo di percorrenza medio è di 1 h e 20 min, la differenza tra i due casi estremi considerati è di 3 minuti.

7.2.1.5 Tempo di fermata

Sono stati considerati vari tempi di fermata oltre a quello più rappresentativo pari a 3 minuti.

Tempo di fermata [s]	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>120</u>	<u>140</u>	<u>160</u>	<u>180</u>	<u>200</u>	<u>220</u>	<u>240</u>	<u>260</u>	<u>280</u>
T/20	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
T.O.I. [min]	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0
T.S. [min]	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3
C.I. [min]	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
% T.O.I. [%]	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%
% T.S. [%]	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%

% C.I. [%]	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%
------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabella 7.2.10: Risultati al variare del tempo di fermata - linea AV - Blocco Fisso

Si può osservare come il tempo di fermata non influenzi il massimo numero di treni prevedibili e il tempo di occupazione di infrastruttura. Si è infatti considerata una stazione intermedia composta da rami deviati che permettono l'accumulo di tre treni per senso di marcia. Per brevi tempi di fermata non si ha contemporanea presenza di treni in stazione, mentre per i casi studiati con fermata maggiore di tre minuti, si hanno al massimo due treni presenti contemporaneamente.

La durata della sosta quindi ha importanza nel calcolo della capacità soltanto se le stazioni lungo la linea hanno soltanto un binario per senso di marcia.

7.2.1.6 Lunghezza delle sezioni di blocco

Si è deciso di prevedere dei limiti di velocità diversi a seconda del numero di sezioni libere anteriormente al treno. Questo è il sistema che viene adottato abitualmente sulle linee ad alta velocità dotate di Blocco Fisso. Come già spiegato, si ha lo svantaggio della non corrispondenza tra spazio di arresto dalla velocità massima e lunghezza della sezione, che rende più complicata la gestione del distanziamento¹. D'altra parte si ha un guadagno di capacità notevole data la minore occupazione dell'infrastruttura rispetto all'antitetica scelta di sezioni di blocco più lunghe dello spazio di arresto.

Lunghezza delle sezioni di blocco [m]	1'800	1'875	2'000	2'250	2'500	3'000
T/20	27	26	25	22	20	16
T.O.I. [min]	88.0	88.1	90.0	88.5	89.0	84.8
T.S. [min]	29.3	29.4	30.0	29.5	29.7	28.3
C.I. [min]	2.6	2.6	0.0	1.9	1.3	6.9
% T.O.I. [%]	73.3%	73.4%	75.0%	73.8%	74.2%	70.7%
% T.S. [%]	24.4%	24.5%	25.0%	24.6%	24.7%	23.6%
% C.I. [%]	2.2%	2.1%	0.0%	1.6%	1.1%	5.8%

Tabella 7.2.11: Risultati al variare della lunghezza delle sezioni di blocco - linea AV - Blocco Fisso

La rappresentazione dei risultati ottenuti è mostrata nel seguente grafico.

¹ Se si utilizzassero sezioni di blocco di lunghezza maggiore della distanza di arresto, sarebbe sufficiente una tecnica di distanziamento elementare che definisce solo due prescrizioni: via libera o avviso di via impedita. Con sezioni più corte, invece, il "via libera" è subordinato al rispetto di un'ulteriore condizione: l'osservanza del limite di velocità (dipendente dal numero di sezioni libere).

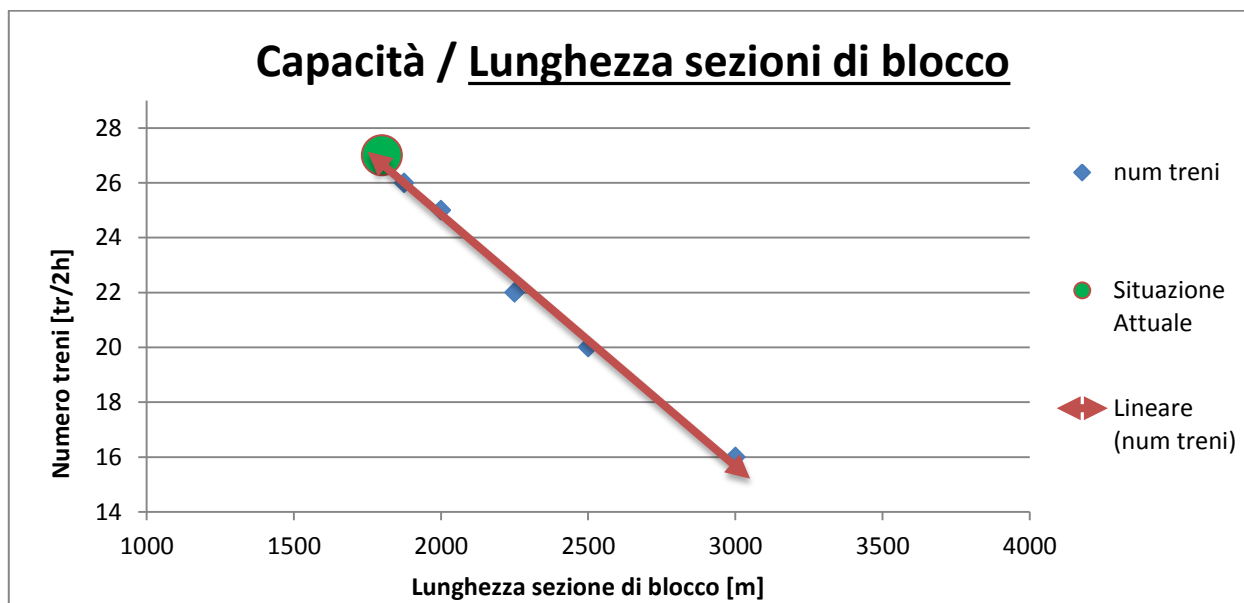


Grafico 7.2.4: Legame tra lunghezza delle sezioni di blocco e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso

Il legame tra numero di treni/ora e lunghezza delle sezioni di blocco è inversamente proporzionale. La variazione del numero di treni è notevole: si passa da 16 treni/2ore per sezioni da 3 km a 27 treni/2ore per sezioni da 1'800 metri. Aumentando la lunghezza, le sezioni di blocco non sono ottimizzate rispetto ai limiti di velocità. Si verifica che essi sono troppo bassi per la lunghezza delle sezioni. Se si volessero utilizzare sezioni di lunghezza diversa occorre ripensare le velocità limite in modo da ottimizzarle rispetto alla loro lunghezza. In generale comunque, sezioni più lunghe restano occupate per più tempo e riducono la capacità. Sezioni più corte sono più vantaggiose per la capacità ma complicano il calcolo del distanziamento: problema comunque risolvibile (in Germania si fa uso del sistema LZB con il quale si può applicare il blocco ultra-corto da 50 metri).

Precedentemente si era spiegato il motivo per cui è utile prevedere sezioni di blocco più corte della distanza di arresto e utilizzare dei limiti di velocità a seconda del numero di blocchi liberi. Questo è stato dimostrato anche da una prova pratica, in cui è stato fatto girare il software in un caso avente sezioni di blocco di lunghezza 6 km. In questo esempio si è previsto che con una sola sezione libera il treno debba arrestarsi, mentre con due sezioni a disposizione può raggiungere la massima velocità d'orario (315 km/h). Gli altri parametri sono stati fissati pari a quelli della situazione di base. Il massimo numero di treni previsto risulta pari a 18 treni/2ore (ben 9 in meno rispetto al caso con sezioni da 1'800 m).

7.2.1.7 Potenza continuata

Le possibilità offerte sul mercato dei materiali rotabili sono numerose, pertanto si osserverà come varia la capacità nel caso di utilizzo di treni con motori di diversa potenza.

Potenza continuata [kW]	<u>7'200</u>	<u>7'600</u>	<u>8'000</u>	<u>8'400</u>	8'800	<u>9'200</u>	<u>9'600</u>	<u>10'000</u>	<u>10'400</u>	<u>10'800</u>	<u>11'200</u>	<u>11'600</u>
T/20	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
T.O.I. [min]	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0
T.S. [min]	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3
C.I. [min]	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
% T.O.I. [%]	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%	73.3%
% T.S. [%]	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%	24.4%
% C.I. [%]	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%

Tabella 7.2.12: Risultati al variare della potenza continuata - linea AV - Blocco Fisso

Si può osservare come la situazione sia stazionaria al variare del parametro considerato.

All'aumentare della potenza, è possibile sfruttare accelerazioni maggiori e quindi ridurre i tempi di occupazione. Questo, a differenza della linea suburbana, avviene poiché le velocità sono alte e ricadono nella zona di caratteristica meccanica limitata dalla curva di potenza massima costante. Tuttavia, come detto, le sezioni che limitano la capacità nel caso in questione sono quelle in cui avviene la frenatura, che non è governata dalla potenza del motore.

7.2.1.8 Velocità d'orario

Di seguito si riportano i risultati al variare delle velocità di servizio considerate.

Velocità d'orario [km/h]	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325	330	335
T/20	28	29	29	29	29	29	30	30	30	27	27	27	27	27	27	27	28
T.O.I. [min]	86.9	89.5	89.0	88.5	87.9	87.4	89.8	89.3	88.7	89.1	88.7	88.4	88.0	87.7	87.3	86.9	89.8
T.S. [min]	29.0	29.8	29.7	29.5	29.3	29.1	29.9	29.8	29.6	29.7	29.6	29.5	29.3	29.2	29.1	29.0	29.9
C.I. [min]	4.1	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	0.2	0.9	1.7	1.2	1.7	2.2	2.6	3.1	3.6	4.1	0.3
% T.O.I. [%]	72.4 %	74.6 %	74.1 %	73.7 %	73.3 %	72.8 %	74.9 %	74.4 %	73.9 %	74.2 %	73.9 %	73.6 %	73.3 %	73.0 %	72.7 %	72.4 %	74.8%
% T.S. [%]	24.1 %	24.9 %	24.7 %	24.6 %	24.4 %	24.3 %	25.0 %	24.8 %	24.6 %	24.7 %	24.6 %	24.5 %	24.4 %	24.3 %	24.2 %	24.1 %	24.9%
% C.I. [%]	3.4%	0.5%	1.1%	1.7%	2.3%	2.9%	0.2%	0.8%	1.4%	1.0%	1.4%	1.8%	2.2%	2.6%	3.0%	3.4%	0.3%

Tabella 7.2.13: Risultati al variare della velocità di servizio - linea AV - Blocco Fisso

Il grafico seguente esemplifica il legame tra capacità e velocità.

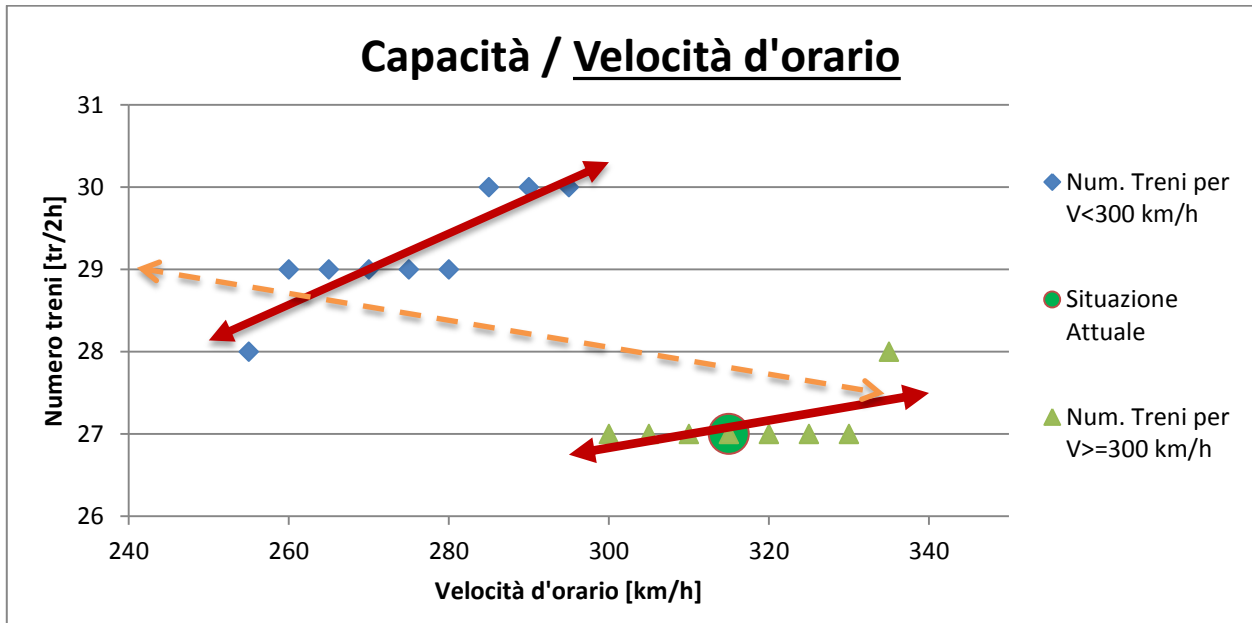


Grafico 7.2.5: Legame tra velocità di servizio e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Fisso

In generale la capacità cresce all'aumentare della velocità ma cambia puntualmente per ogni velocità "di confine" (300 km/h, 250 km/h, 180 km/h, ecc.) dove decresce per un aumento del distanziamento pari ad una sezione di blocco. Infatti, il grafico evidenzia uno scalino per velocità pari a 300 km/h, dove si ha una brusca diminuzione del massimo numero di treni prevedibili. I risultati ottenuti sono qualitativamente in linea con quanto ricavabile applicando lo studio di Poggio (paragrafo 3.3.1). Si verifica infatti che tale velocità sia il "confine" tra distanziamento di 6 e 5 sezioni di blocco. La differenza puntuale di numero di treni è pari a 3 treni/2ore. Aumentando la velocità fino a 335 km/h si ottiene un incremento da 27 a 28 treni/2ore. Quindi se si guarda nel complesso la situazione, il numero di treni decresce globalmente all'aumentare della velocità (linea di tendenza tratteggiata arancione), anche se localmente in ogni singolo range di velocità, compreso tra i due confini, il numero di treni aumenta (linee di tendenza rosse).

Il fatto che la capacità decresce con l'aumento della velocità di regime è dovuto al maggior intervallo di tempo tra il passaggio di un treno e l'altro, causato dal distanziamento maggiore previsto all'aumentare delle velocità. Infatti, se un treno viaggiasse alla velocità di 295 km/h, massima velocità per cui il distanziamento è pari a 5 sezioni, percorrerebbe tale spazio in 110 secondi, mentre se viaggiasse a 335 km/h, massima velocità per cui il distanziamento è pari a 6 sezioni, percorrerebbe tale spazio in 116 secondi. Quindi la diminuzione del distanziamento ha un'incidenza maggiore rispetto all'aumento della velocità.

La linea ad alta velocità fornisce l'esempio più adatto per mostrare come il concetto di capacità non possa essere esaurito dalla determinazione del massimo numero di treni/ora. È evidente che si avrebbe un elevato numero di treni per basse velocità, ma non è questa la situazione che fornisce la massima capacità, il cui concetto deve essere più ampio in modo da tenere in conto la velocità dei treni, l'eterogeneità del traffico e la stabilità dell'orario. Il massimo numero di treni si otterrebbe per velocità talmente basse che sarebbero in contraddizione con lo stesso termine "alta velocità": è per questo motivo che si è scelto di non far variare il parametro velocità al di sotto di 250 km/h.

7.2.1.9 Sintesi dei risultati ottenuti

Ricapitolando quanto dedotto nei paragrafi precedenti, si riassumono i risultati ottenuti in un grafico che mostra l'effetto dei vari parametri sulla capacità. Per ottenere un'unica rappresentazione si sono considerate le variazioni dei vari parametri in percentuale rispetto alla situazione del caso base.

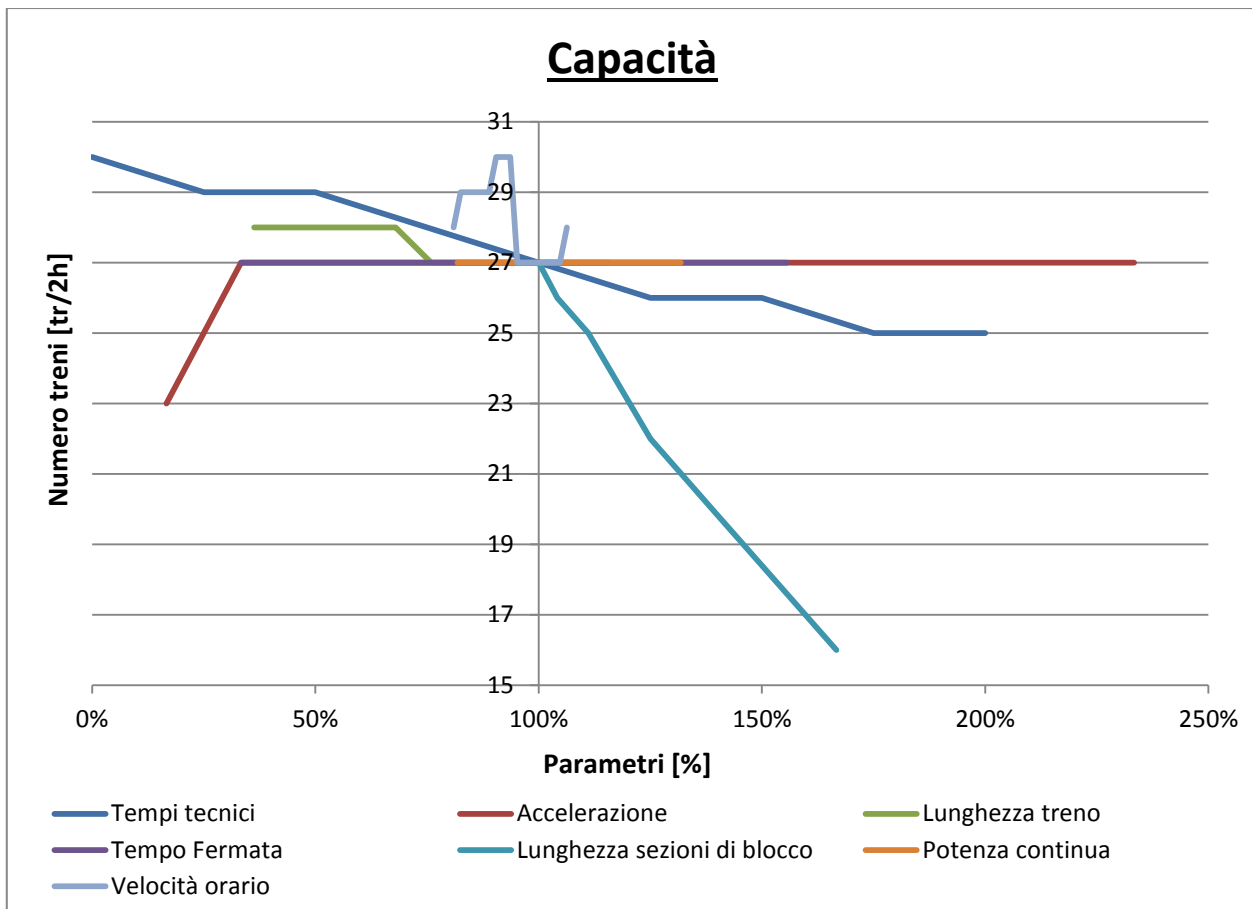


Grafico 7.2.6: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea AV – Blocco Fisso

I parametri la cui variazione percentuale ha maggiore influenza sulla capacità sono la velocità e la lunghezza delle sezioni di blocco.

Il tempo di fermata in stazione e la potenza del treno sono ininfluenti (almeno all'interno del range di valori considerato). Anche l'accelerazione è ininfluente, a meno di considerare accelerazioni talmente basse che non sono per nulla rappresentative di linee ad alta velocità, ma in generale per nessuna linea ferroviaria.

La capacità risente invece, anche se non in maniera fondamentale, della durata dei tempi tecnici e, in misura ancora inferiore, della lunghezza dei treni.

Il grafico riporta soltanto l'opportunità tecnica e non economica riguardo alla variazione dei parametri.

In alcuni casi, pur senza variazione di numero di treni prevedibili, la variazione di alcuni parametri può portare a vantaggi in termini di stabilità dell'orario, riducendo il tempo di occupazione dell'infrastruttura. Lo si può osservare nel Grafico 7.2.7, dove sono state riportate le percentuali di occupazione dell'infrastruttura riferite al numero di treni originariamente previsti nell'orario.

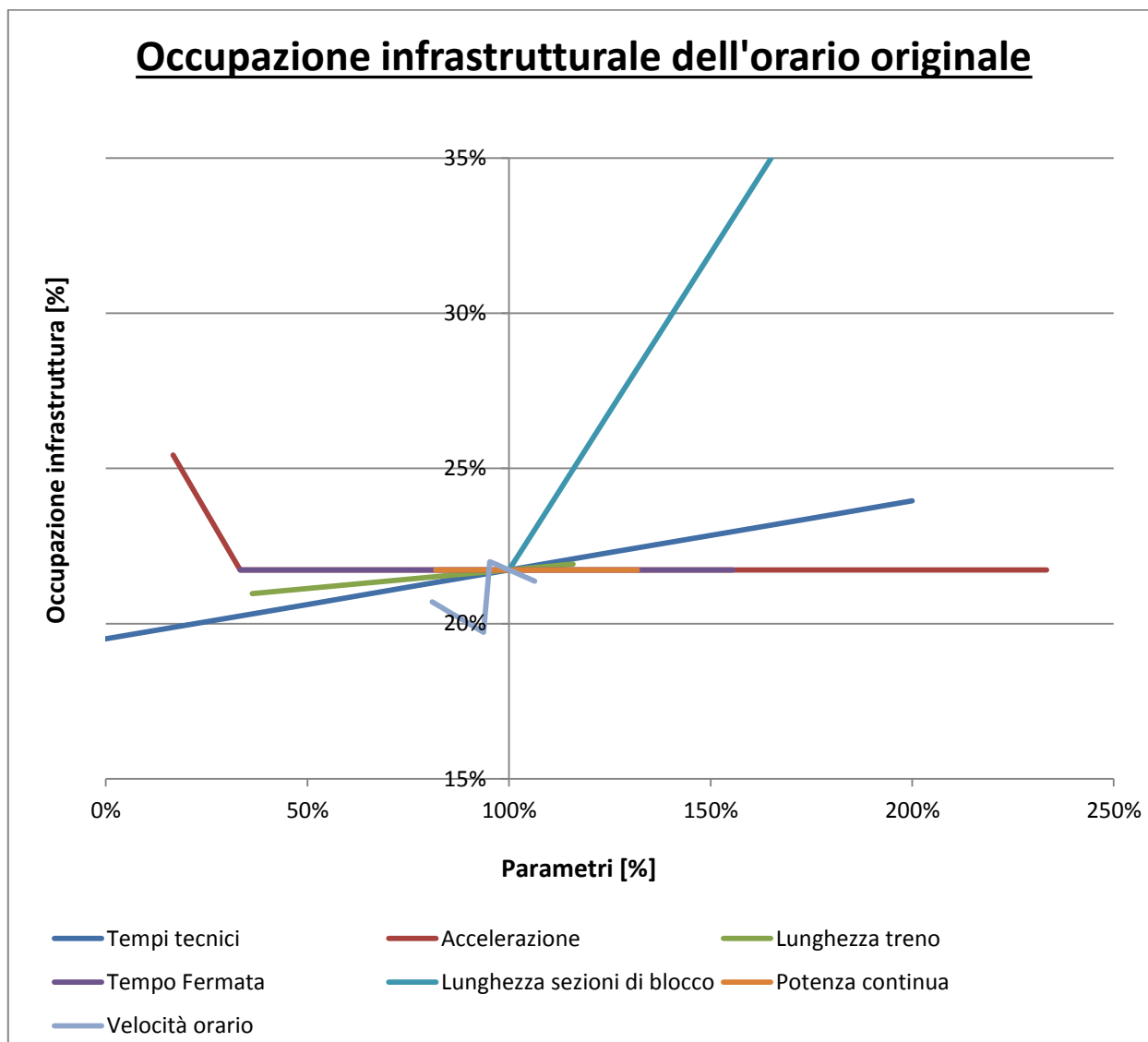


Grafico 7.2.7: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea AV – Blocco Fisso

Il tempo di fermata e la potenza del treno non giocano alcun ruolo. Come detto possono essere accolti fino a tre treni in stazione, la durata della fermata non incide a meno che non porti a saturazione la capacità della stazione (ma fino a 5 minuti di fermata non è questo il caso). La sezione più critica rimane quella in frenatura anche per le più basse potenze dei motori adottate.

7.2.2 Blocco Mobile

La linea gestita con un distanziamento a Blocco Mobile non prevede più sezioni di blocco. Il distanziamento è dato dai seguenti termini:

- distanza di arresto;

- tempi tecnici + tempo di reazione;
- lunghezza treno;
- franco di sicurezza.

In questo paragrafo sono stati utilizzati i codici di calcolo riferiti agli algoritmi di Figura 6.2.1, Figura 6.4.3 e Figura 6.4.4.

7.2.2.1 Situazione di base

Così come per il caso di distanziamento a Blocco Fisso, è stato necessario definire una situazione base, in modo da riferirsi sempre a questa, variando di volta in volta uno solo dei parametri. Per comodità si intenderanno d'ora in poi per tempi tecnici nel sistema a Blocco Mobile, l'insieme dei tempi tecnici propriamente detti e del tempo di reazione del macchinista.

I tempi tecnici sono dati dalle seguenti sotto-voci (dedotte dallo studio commissionato dall'UIC al Verkeherswissenschaftliches Institute di Aquisgrana [17]).

Tempo per il controllo dell'integrità del treno [s]	9
Tempo per la trasmissione dei dati tra treno1 e RBC [s]	3
Tempo di elaborazione del RBC [s]	4
Tempo per la trasmissione dei dati tra RBC e treno2 [s]	3
Tempo di elaborazione del computer di bordo [s]	3
Tempo di reazione del macchinista [s]	3
<i>Tempo totale [s]</i>	<i>25</i>
Franco di sicurezza [m]	1'000

Tabella 7.2.14: Tempi di blocco e Franco di sicurezza – linea AV – Blocco Mobile

Si è scelto un franco di sicurezza di 1 km, in modo tale che sia rapportato allo spazio di frenatura alla velocità d'orario (5 km). In tal modo ci si cautela con un incremento del 20% della distanza di arresto. Questo franco può essere alternativamente interpretato come un margine di 11 s in caso di ritardo di inizio della frenata (è il tempo in cui viene percorso 1 km alla velocità di 315 km/h).

Se si applica questo scenario all'orario originale precedentemente presentato (8 treni/2ore), si ottengono i seguenti risultati.

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	16.3
Tempo di sicurezza [min]	5.4
Capacità inutilizzata [min]	98.3

Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	13.6%
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	4.5%
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	81.9%
Treni nella finestra di tempo	8
Velocità media delle tracce [km/h]	274
Consumo di capacità [%]	18.1%
Stabilità	86.4%
Eterogeneità	0.0%

Tabella 7.2.15: Risultati della compressione dell'orario originale – linea AV – Blocco Mobile

Come in precedenza, si nota che anche con il distanziamento a Blocco Mobile possono essere inseriti nell'orario ulteriori treni fino al raggiungimento del limite di occupazione consigliato dall'UIC. Si sono ottenuti i seguenti valori:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	89.5
Tempo di sicurezza [min]	29.8
Capacità inutilizzata [min]	0.7
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	74.6%
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	24.9%
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	0.6%
Treni nella finestra di tempo	44
Velocità media delle tracce [km/h]	274
Consumo di capacità [%]	99.5%
Stabilità	25.5%
Eterogeneità	0.0%

Tabella 7.2.16: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea AV – Blocco Mobile

Si stima dunque un possibile incremento di 36 treni/2ore. Rispetto al distanziamento a Blocco Fisso è possibile l'inserimento di ulteriori 17 treni/2ore. Questo risultato è motivato dall'utilizzo più razionale che questo tipo di distanziamento fa della linea, valutando l'occupazione in funzione della velocità corrente del treno. In questo caso può intendersi l'occupazione non come il tratto di linea fisicamente occupato dal treno, ma come lo spazio che deve essere necessariamente libero dinnanzi al treno. In seguito si cercheranno le motivazioni di una simile differenza di risultati tra i due sistemi.

Ora si analizzano i risultati di capacità al variare dei parametri considerati, in modo da considerare una vasta gamma di casi, comprensiva di diverse possibili situazioni reali.

7.2.2.2 Tempi tecnici

E' stata fatta una scelta per lo scenario di base, ma comunque si effettua lo studio su un range ampio: si è deciso di arrivare fino a 40 s, caso che potrebbe adattarsi ai primi utilizzi in assoluto, che plausibilmente saranno cautelativi.

Tempi tecnici [s]	0	5	10	15	20	25	30	35	40
T/20	56	52	50	48	46	44	42	40	39
T.O.I. [min]	89.6	88.4	88.3	89.6	88.9	89.5	88.2	88.0	88.4
T.S. [min]	29.9	29.5	29.4	29.9	29.6	29.8	29.4	29.3	29.5
C.I. [min]	0.5	2.1	2.2	0.5	1.4	0.7	2.4	2.7	2.1
% T.O.I. [%]	74.7%	73.7%	73.6%	74.7%	74.1%	74.6%	73.5%	73.3%	73.7%
% T.S. [%]	24.9%	24.6%	24.5%	24.9%	24.7%	24.9%	24.5%	24.4%	24.6%
% C.I. [%]	0.4%	1.8%	1.9%	0.4%	1.2%	0.6%	2.0%	2.2%	1.8%

Tabella 7.2.17: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea AV - Blocco Mobile

Nel grafico seguente si può osservare l'incidenza della variazione dei tempi tecnici sulla capacità.

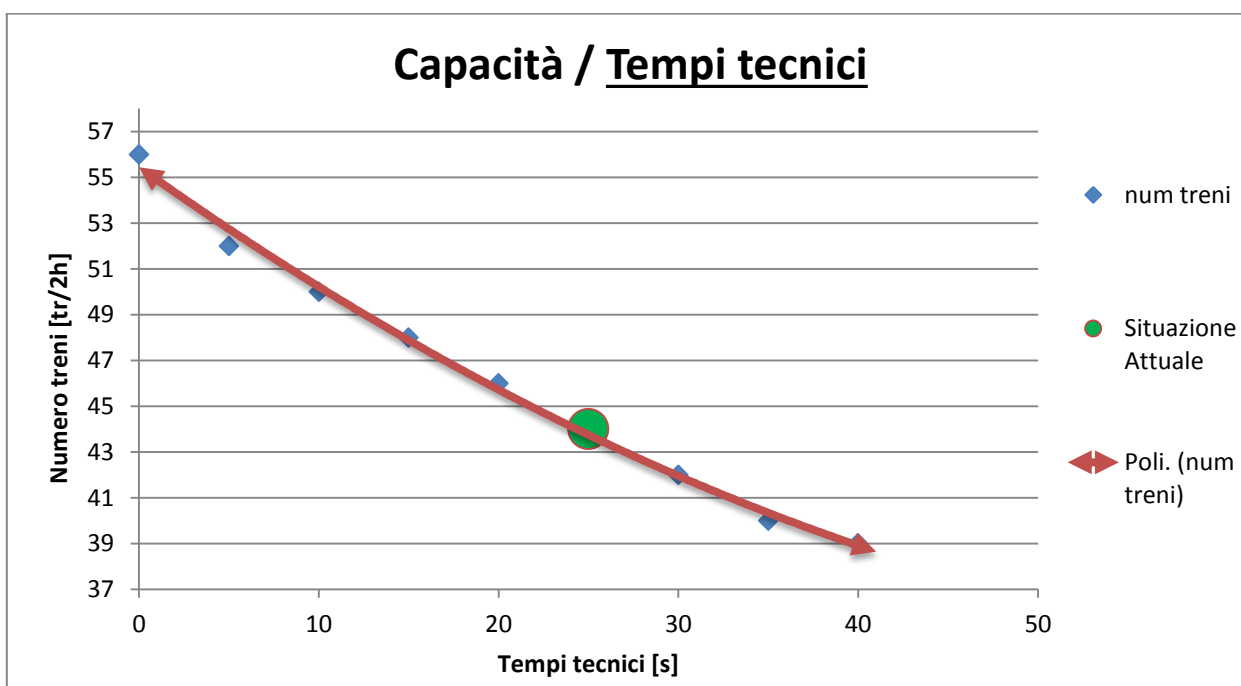


Grafico 7.2.8: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile

Si passa da 56 treni/2ore per tempi tecnici nulli, a 39 treni/2ore per tempi tecnici pari a 40 s. Il legame è inversamente proporzionale, infatti i tempi tecnici necessari per la trasmissione delle informazioni da un treno al treno seguente determinano un perditempo che obbliga a tenere una distanza di sicurezza aggiuntiva pari allo spazio percorso durante il trascorrere dei tempi tecnici.

7.2.2.3 Accelerazione di servizio

Si sono studiati i casi di variazione di accelerazione già considerati nell'analogo caso di distanziamento a Blocco Fisso.

% acc. di servizio	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%
Acc. di servizio [m/s ²]	<u>0.09</u>	<u>0.18</u>	<u>0.27</u>	<u>0.36</u>	<u>0.45</u>	0.54	<u>0.63</u>	<u>0.72</u>	<u>0.81</u>	<u>0.9</u>	<u>0.99</u>	<u>1.08</u>	<u>1.17</u>	<u>1.26</u>
T/20	31	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
T.O.I. [min]	88.9	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5
T.S. [min]	29.6	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8
C.I. [min]	1.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
% T.O.I. [%]	74%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
% T.S. [%]	24.7%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%
% C.I. [%]	1.3%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%

Tabella 7.2.18: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea AV - Blocco Mobile

Nel grafico seguente sono stati riportati i risultati sopra esposti.

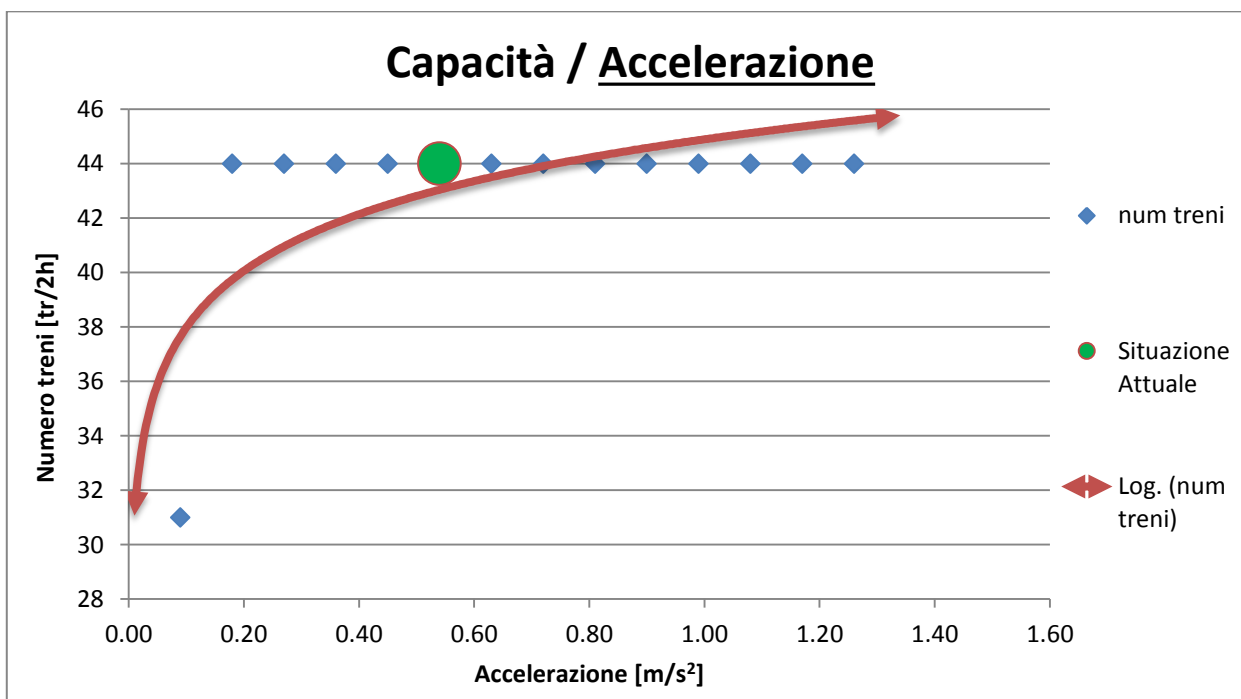


Grafico 7.2.9: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile

L'accelerazione è un parametro significativo per bassi valori, mentre al suo aumentare la capacità non cresce ulteriormente. Accelerazioni basse determinano un prolungamento dell'occupazione di

infrastruttura e una conseguente riduzione di capacità. Questo effetto diventa più critico rispetto alla frenatura soltanto per accelerazioni troppo basse rispetto a valori rappresentativi di casi reali; in sostanza si può dire che tale parametro non incide sulla capacità.

7.2.2.4 Lunghezza del treno

I casi considerati sono i medesimi affrontati precedentemente nel paragrafo 7.2.1.4.

Numero di carrozze passeggeri	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Lunghezza del treno [m]	119	145	171	197	223	249	275	302	328	354	380
Massa in servizio [t]	276	322	369	415	465	508	555	601	648	694	741
T/20	45	45	45	45	45	44	44	44	44	44	43
T.O.I. [min]	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	88.9
T.S. [min]	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.6
C.I. [min]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.5
% T.O.I. [%]	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.1%
% T.S. [%]	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.7%
% C.I. [%]	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	1.3%

Tabella 7.2.19: Risultati al variare della lunghezza dei treni - linea AV - Blocco Mobile

Nel grafico seguente sono stati riportati i risultati sopra esposti.

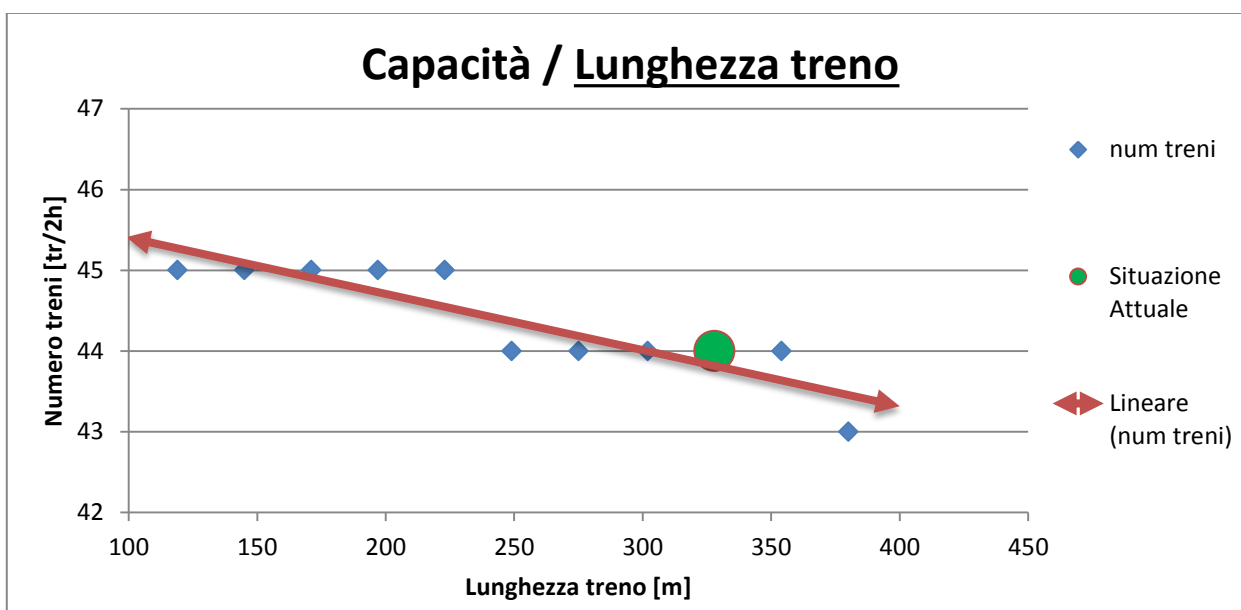


Grafico 7.2.10: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile

L'aumento della lunghezza del treno, anche nel distanziamento a Blocco Mobile, comporta una riduzione della capacità, in quanto il treno occupa fisicamente un più esteso tratto di linea. Anche qui vale quanto detto nel paragrafo 7.2.1.4 sulla variazione di peso e l'incidenza sul tempo di percorrenza.

7.2.2.5 Tempo di fermata

Si sono scelte anche qui le stesse situazioni per poter poi eseguire un raffronto diretto.

Tempo di fermata [s]	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>120</u>	<u>140</u>	<u>160</u>	<u>180</u>	<u>200</u>	<u>220</u>	<u>240</u>	<u>260</u>	<u>280</u>
T/20	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
Treni contemporanea- mente in stazione	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
T.O.I. [min]	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5
T.S. [min]	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8
C.I. [min]	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
% T.O.I. [%]	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%
% T.S. [%]	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%
% C.I. [%]	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%

Tabella 7.2.20: Risultati al variare del tempo di fermata - linea AV - Blocco Mobile

Nella stazione intermedia possono essere ospitati fino a 3 treni contemporaneamente, questa limitazione non incide sulla capacità, almeno per fermate inferiori a circa 5 minuti.

È di maggior interesse il caso di stazione composta da due soli binari per senso di marcia, questo dato costituirebbe un vincolo per fermate superiori a 200 secondi. Infatti, in questo caso, la sezione di blocco critica diventerebbe quella contenente la stazione in quanto un treno può entrarci solo se almeno uno dei due binari è libero. Affinché la circolazione rimanga imperturbata con fermate così lunghe, la frequenza dei treni non può rimanere di 44 treni/2ore ma deve diminuire al crescere del tempo di fermata.

Di seguito si mostra come il massimo numero di treni/ora diminuisca all'aumentare del tempo di fermata, posta la capacità della stazione intermedia pari a due treni.

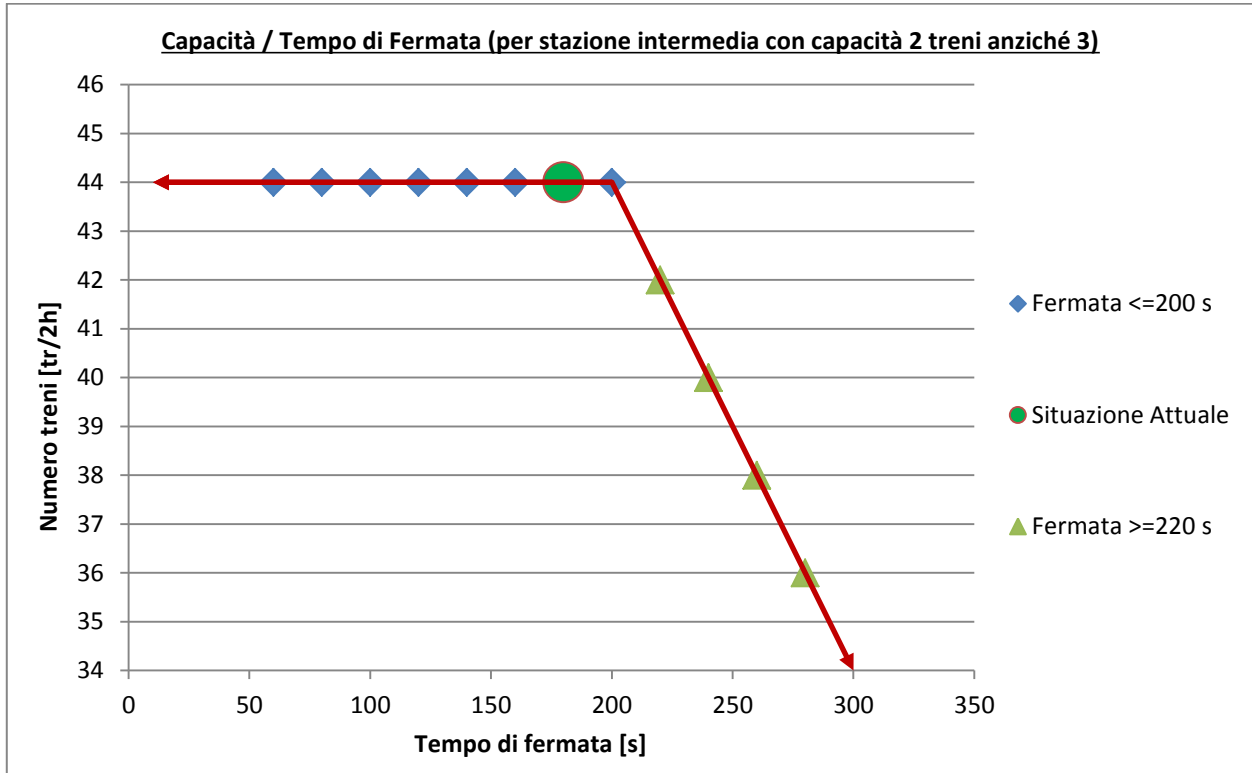


Grafico 7.2.11: Legame tra tempo di fermata e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile

Pur potendo circolare 44 treni/2ore sulla linea, non ci sarebbe possibilità di riceverli tutti quanti in stazione. Per fermate di 280 secondi la capacità scende fino a 36 treni/2ore (8 treni in meno rispetto alla potenzialità della linea).

7.2.2.6 Potenza continuata

Sono state considerate le stesse situazioni del Blocco Fisso per poter poi eseguire un raffronto diretto.

Potenza continuata [kW]	<u>7200</u>	<u>7600</u>	<u>8000</u>	<u>8400</u>	<u>8800</u>	<u>9'200</u>	<u>9'600</u>	<u>10'000</u>	<u>10'400</u>	<u>10'800</u>	<u>11'200</u>	<u>11'600</u>
T/20	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
T.O.I. [min]	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5
T.S. [min]	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8
C.I. [min]	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
% T.O.I. [%]	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%	74.6%
% T.S. [%]	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%	24.9%
% C.I. [%]	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%

Tabella 7.2.21: Risultati al variare della potenza continuata - linea AV - Blocco Mobile

La potenza non ha rilevanza per gli stessi motivi enunciati nel paragrafo 7.2.1.7.

7.2.2.7 Velocità d'orario

Sono state considerate le seguenti situazioni.

Velocità d'orario [km/h]	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325	330	335
T/20	50	50	50	49	48	48	47	47	46	45	45	45	44	43	42	42	42
T.O.I. [min]	88.3	90.0	90.0	89.8	89.6	89.6	89.3	89.3	88.9	88.5	90.0	90.0	89.5	88.9	88.2	88.2	89.6
T.S. [min]	29.4	30.0	30.0	29.9	29.9	29.9	29.8	29.8	29.6	29.5	30.0	30.0	29.8	29.6	29.4	29.4	29.9
C.I. [min]	2.2	0.0	0.0	0.2	0.5	0.5	0.9	0.9	1.4	2.0	0.0	0.0	0.7	1.5	2.4	2.4	0.5
% T.O.I. [%]	73.6 %	75.0 %	75.0 %	74.9 %	74.7 %	74.7 %	74.4 %	74.4 %	74.1 %	73.8 %	75.0 %	75.0 %	74.6 %	74.1 %	73.5 %	73.5 %	74.7 %
% T.S. [%]	24.5 %	25.0 %	25.0 %	25.0 %	24.9 %	24.9 %	24.8 %	24.8 %	24.7 %	24.6 %	25.0 %	25.0 %	24.9 %	24.7 %	24.5 %	24.5 %	24.9 %
% C.I. [%]	1.9%	0.0%	0.0%	0.2%	0.4%	0.4%	0.8%	0.8%	1.2%	1.7%	0.0%	0.0%	0.6%	1.3%	2.0%	2.0%	0.4%

Tabella 7.2.22: Risultati al variare della velocità d'orario - linea AV - Blocco Mobile

Il grafico è il seguente.

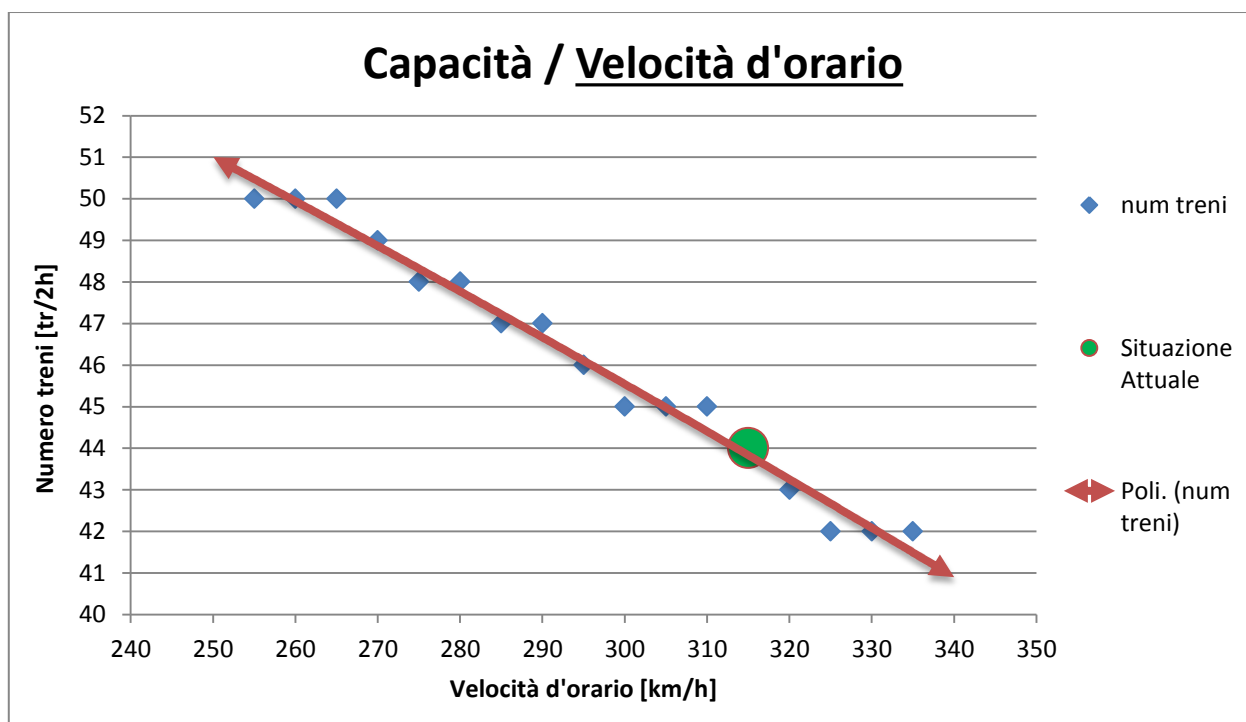


Grafico 7.2.12: Legame tra velocità d'orario e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile

Il legame tra velocità e numero di treni è inversamente proporzionale. Ciò si verifica perché il distanziamento aumenta con la velocità e quindi i treni transitano con un intervallo di tempo

maggiore l'uno dall'altro. Per velocità di regime pari a 265 km/h potrebbero circolare 50 treni nell'intervallo di tempo di 2 ore, oltre i 325 km/h la capacità scende a 32 treni. Non sono state considerate velocità inferiori a 250 km/h perché non sarebbero compatibili con il livello di servizio richiesto per questo tipo di linea in termini di velocità media di percorrenza.

7.2.2.8 Franco di sicurezza

I seguenti sono i risultati di capacità per una data gamma di valori di franco di sicurezza.

Franco di sicurezza [m]	<u>0</u>	<u>200</u>	<u>400</u>	<u>600</u>	<u>800</u>	<u>1'000</u>	<u>1'200</u>	<u>1'400</u>	<u>1'600</u>	<u>1'800</u>
T/20	49	48	46	45	45	44	43	42	42	40
T.O.I. [min]	89.8	89.6	88.9	88.5	90.0	89.5	88.9	88.2	89.6	88.0
T.S. [min]	29.9	29.9	29.6	29.5	30.0	29.8	29.6	29.4	29.9	29.3
C.I. [min]	0.2	0.5	1.4	2.0	0.0	0.7	1.5	2.4	0.5	2.7
% T.O.I. [%]	74.9%	74.7%	74.1%	73.8%	75.0%	74.6%	74.1%	73.5%	74.7%	73.3%
% T.S. [%]	25.0%	24.9%	24.7%	24.6%	25.0%	24.9%	24.7%	24.5%	24.9%	24.4%
% C.I. [%]	0.2%	0.4%	1.2%	1.7%	0.0%	0.6%	1.3%	2.0%	0.4%	2.2%

Tabella 7.2.23: Risultati al variare del franco di sicurezza - linea AV - Blocco Mobile

Il grafico è il seguente.

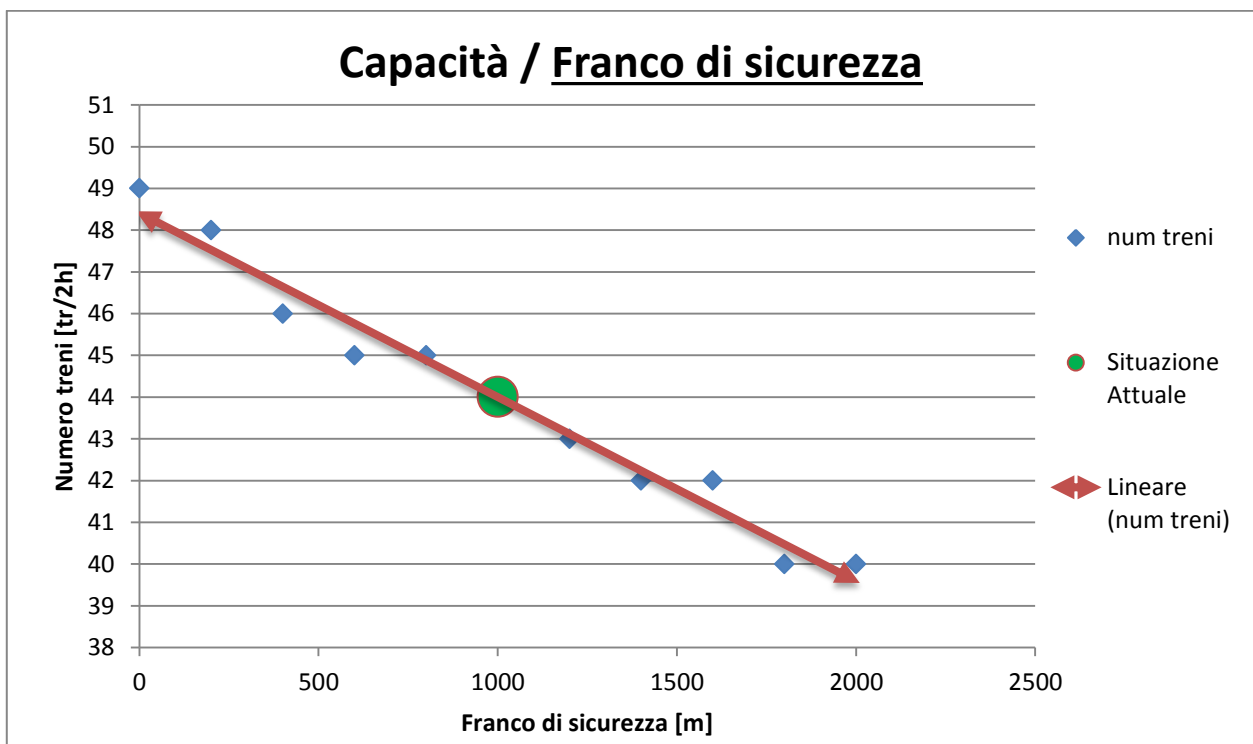


Grafico 7.2.13: Legame tra franco di sicurezza e massimo numero di treni – linea AV – Blocco Mobile

Evidentemente una diminuzione del franco permette una maggiore compattazione dei treni in linea: da 40 treni/2ore per un franco di 2 km a 49 treni/2ore per un franco nullo.

7.2.2.9 Sintesi dei risultati ottenuti

Ricapitolando quanto dedotto nei paragrafi precedenti, si riassumono i risultati ottenuti in un grafico che mostra l'effetto dei vari parametri sulla capacità. Per ottenere un'unica rappresentazione si sono considerate le variazioni dei vari parametri in percentuale rispetto alla situazione del caso di base.

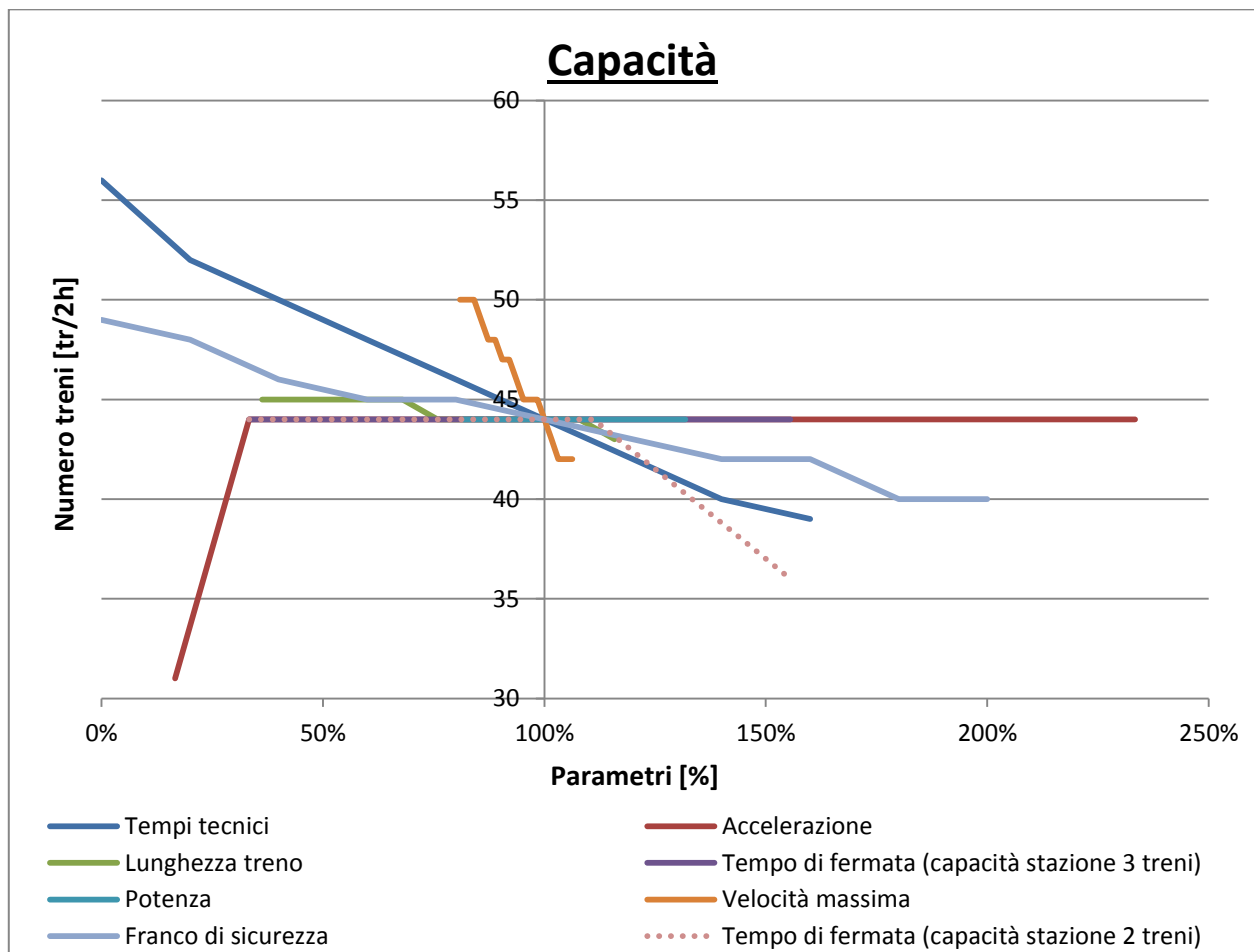


Grafico 7.2.14: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea AV – Blocco Mobile

La curva più ripida risulta essere quella riferita alla velocità d'orario. Altri parametri influenti sono i tempi tecnici e il franco di sicurezza, ma hanno influenza inferiore. Infine hanno anch'essi rilevanza, ma ancora minore, la lunghezza del treno e l'accelerazione. Quest'ultima può essere esclusa poiché diventa cruciale soltanto per accelerazioni così basse da non avere interesse nei casi pratici. Considerando una stazione intermedia con possibilità di ospitare tre treni, allora il

tempo di fermata in stazione non ha rilevanza, se invece si ha una stazione con un binario in meno per senso di marcia, si ha una variazione nel numero di treni (linea tratteggiata rosa).

Si ricorda, come già evidenziato, che ad una identica percentuale di variazione di due parametri non corrisponde un'eguale fattibilità o eguali costi per attuare la relativa variazione. Ad esempio, se si riduce il tempo tecnico da 25 a 20 secondi, la diminuzione percentuale del parametro è pari al 20%, ma se si applica una riduzione del 20% sulla velocità essa scende da 315 km/h a 250 km/h (che è ai limiti del campo di velocità considerato).

In alcuni casi, pur senza variazione del massimo numero di treni, la variazione di alcuni parametri può portare a vantaggi in termini di stabilità dell'orario, riducendo il tempo di occupazione dell'infrastruttura. Lo si può osservare nel grafico seguente, dove sono state riportate le percentuali di occupazione dell'infrastruttura riferite al numero di treni originariamente previsti nell'orario.

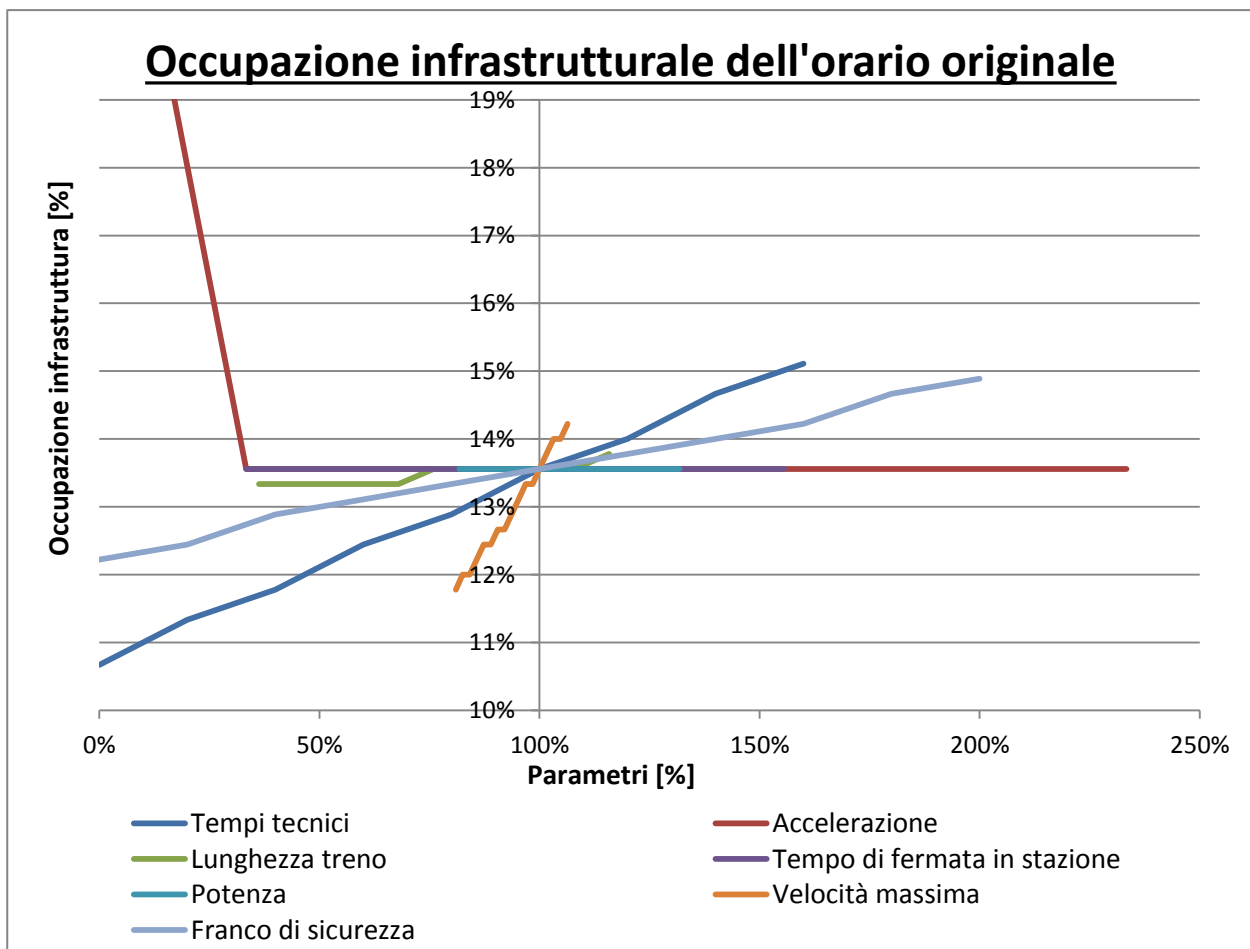


Grafico 7.2.15: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea AV – Blocco Mobile

7.2.3 Confronto

Dall'analisi dei risultati ottenuti si nota che la potenzialità della linea ad alta velocità cresce con il miglioramento del livello tecnologico del segnalamento e al passare dal distanziamento a Blocco Fisso a quello a Blocco Mobile.

A differenza della linea suburbana, si nota dal grafico dell'orario nel diagramma tempo/spazio che le occupazioni di infrastruttura non danno luogo a vuoti evidenti tra una traccia e l'altra. Questo è garantito dal fatto di considerare treni tutti uguali e facenti lo stesso identico servizio uno dopo l'altro (come per la linea suburbana), ma con in più il vantaggio di avere stazioni con più binari. In questo modo un treno fermo non occupa inutilmente la linea.

Sono comunque presenti dei vuoti nell'occupazione di infrastruttura: li si può vedere nei tratti di accelerazione e regime, sia nel distanziamento a Blocco Fisso che in quello a Blocco Mobile. Essi si creano poiché l'accostamento delle tracce avviene nelle sezioni di frenatura (che sono le più critiche nell'occupazione di infrastruttura). Nel primo sistema i treni potrebbero tendenzialmente viaggiare a regime distanziati di almeno 6 sezioni, cioè circa 11 km (senza contare tempi tecnici e lunghezza del treno), in realtà dal momento che in frenatura le sezioni sono occupate per più tempo, il distanziamento tra due treni è di circa 17 km e così si perde una fetta di capacità. Nella Figura 2.1.1 vi è il dettaglio di due tracce consecutive (linee blu) in prossimità della stazione, la loro rispettiva occupazione di infrastruttura (regioni rosse) e il distanziamento in due punti significativi.

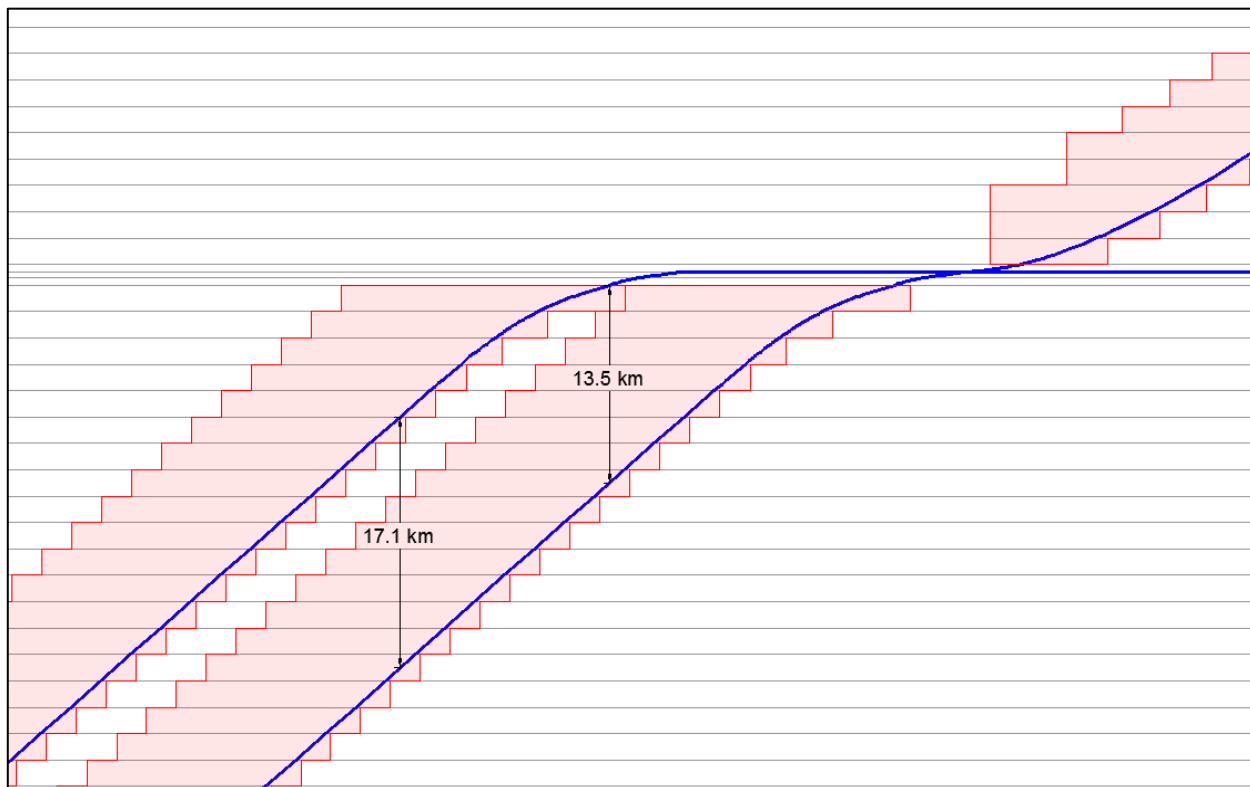


Figura 7.2.4: Minimo distanziamento pratico - linea AV - Blocco Fisso

Si vede come nel momento in cui il primo dei due treni frena, il numero di sezioni di blocco libere necessarie al treno seguente è 6, poiché in quell'istante e per altre sei sezioni il treno seguente continua a tenere la velocità di regime. La ripartenza potrebbe in teoria avvenire prima, ma se così fosse il tempo di fermata sarebbe inferiore per il secondo treno e ad ogni modo dovrebbe rallentare prima di quanto farebbe se indisturbato perché ad un certo punto il treno antecedente rallenta per fermarsi nell'ultima stazione.

Per il Blocco Mobile avviene lo stesso, la traccia di un treno in frenatura vincola il treno successivo a tenere una maggiore distanza, perché il distanziamento del treno successivo a regime arriva ad invadere la tratta di frenatura. Come in precedenza, in Figura 7.2.5, si rappresentano due tracce (colore blu) in prossimità della stazione, il distanziamento in continuo (regione rossa) e il particolare distanziamento in due punti significativi.

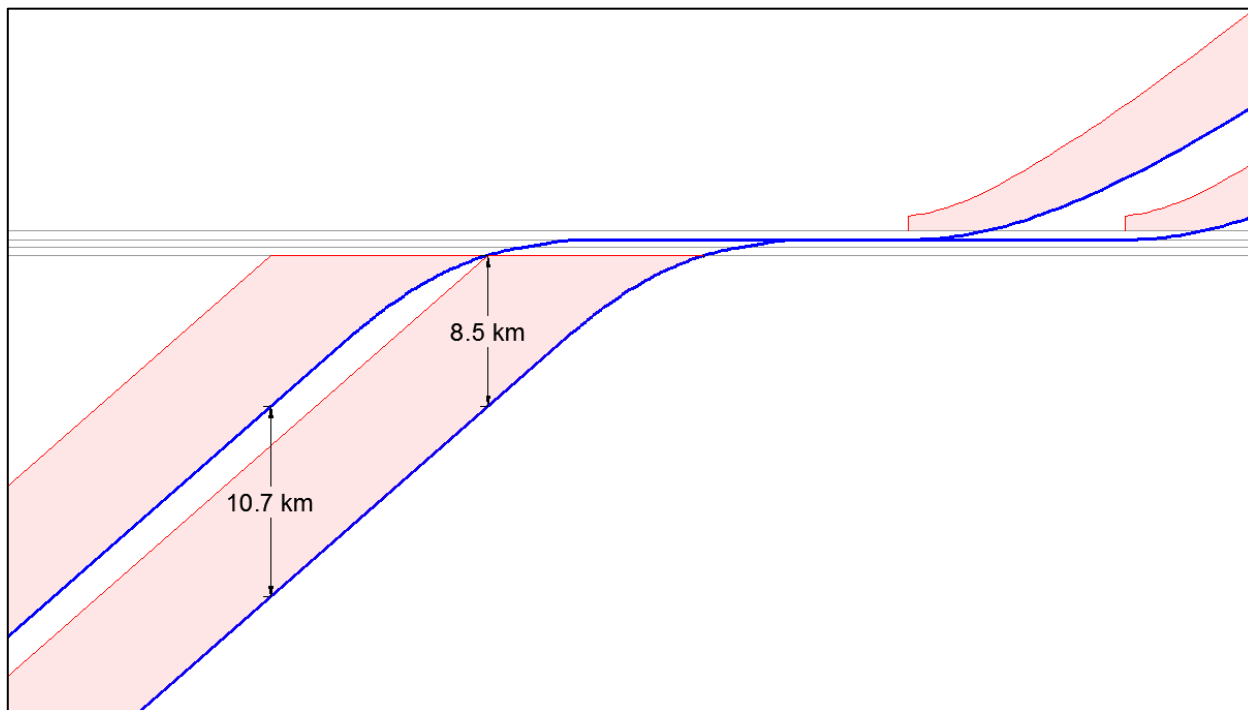


Figura 7.2.5: Minimo distanziamento pratico - linea AV - Blocco Mobile

Capita dunque che il distanziamento a regime (pari alla distanza di arresto a 315 km/h più 1 km di franco più la lunghezza del treno e lo spazio percorso durante i tempi tecnici), circa 8,5 km, viene tenuto solamente in un punto, mentre per il resto del tragitto il distanziamento è superiore ai 10 km.

Nel distanziamento a Blocco Mobile l'accostamento delle tracce avviene in modo più efficiente. Infatti la sezione critica corrisponde al punto in cui il distanziamento del treno tocca la traccia del treno che lo precede, generando così uno scostamento che nel resto della linea è superiore al distanziamento a regime.

Anche ammettendo di accostare perfettamente nell'orario le tracce e portando al limite entrambi i sistemi di distanziamento, si ha nel Blocco Fisso un distanziamento a regime superiore a quello corrispondente al Blocco Mobile. Questo è dovuto al non istantaneo tempo di percorrenza di una sezione di blocco. Se le sezioni a Blocco Fisso fossero infinitesime esse verrebbero liberate in un tempo infinitesimo e a quel punto il sistema di distanziamento coinciderebbe con il distanziamento a Blocco Mobile.

Si vuole ora studiare ciò che differenzia le potenzialità tra i due sistemi. Si ha che dalle analisi effettuate, il distanziamento a Blocco Mobile risulta maggiormente vantaggioso rispetto al fisso.

In particolare se si sfrutta al 100% la capacità della linea, l'incremento del numero di treni che si otterrebbe passando dal sistema di base a Blocco Fisso al distanziamento a Blocco Mobile nel caso di base sarebbe del 63% (da 27 a 44 treni in 2 ore). Si riportano di seguito i confronti relativi alle voci in comune tra i due sistemi di distanziamento (tempi tecnici, accelerazione, lunghezza treno, tempo di fermata, potenza, velocità di regime). Per i parametri *lunghezza delle sezioni di blocco* e *franco di sicurezza* non può essere eseguito un raffronto in quanto i due parametri non hanno un corrispondente nell'opposto sistema di distanziamento.

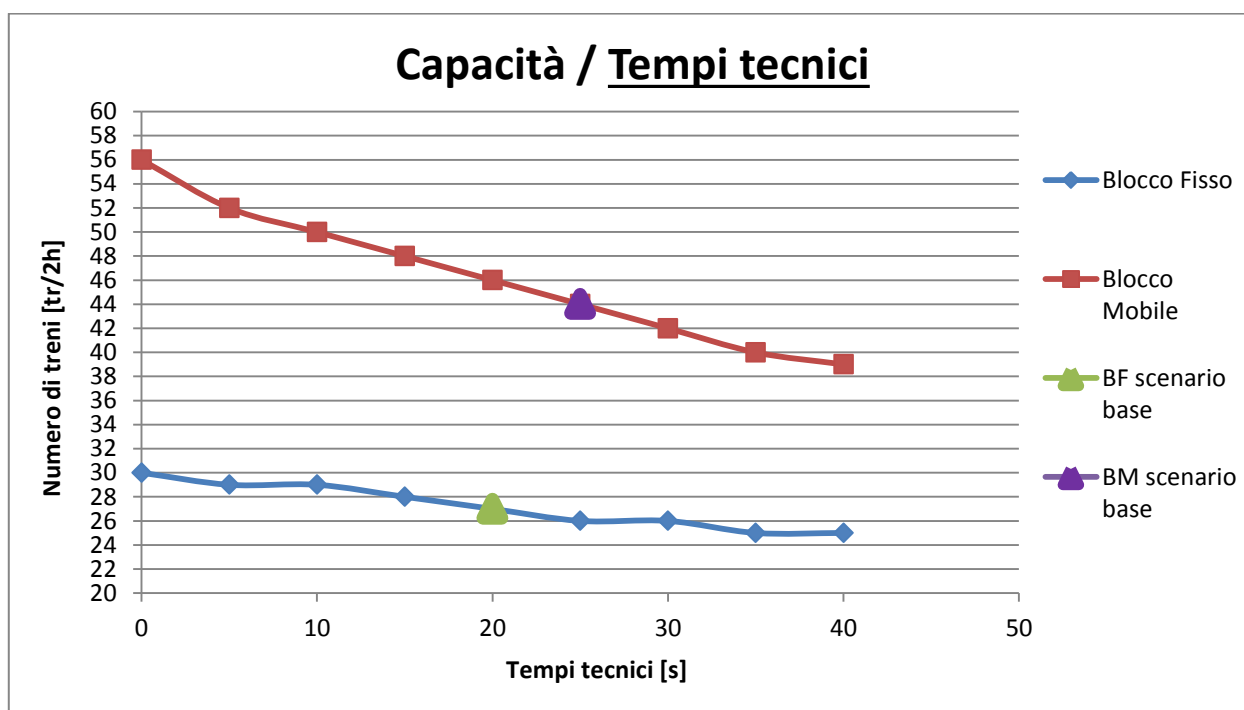


Grafico 7.2.16: Confronto al variare dei tempi tecnici - linea AV

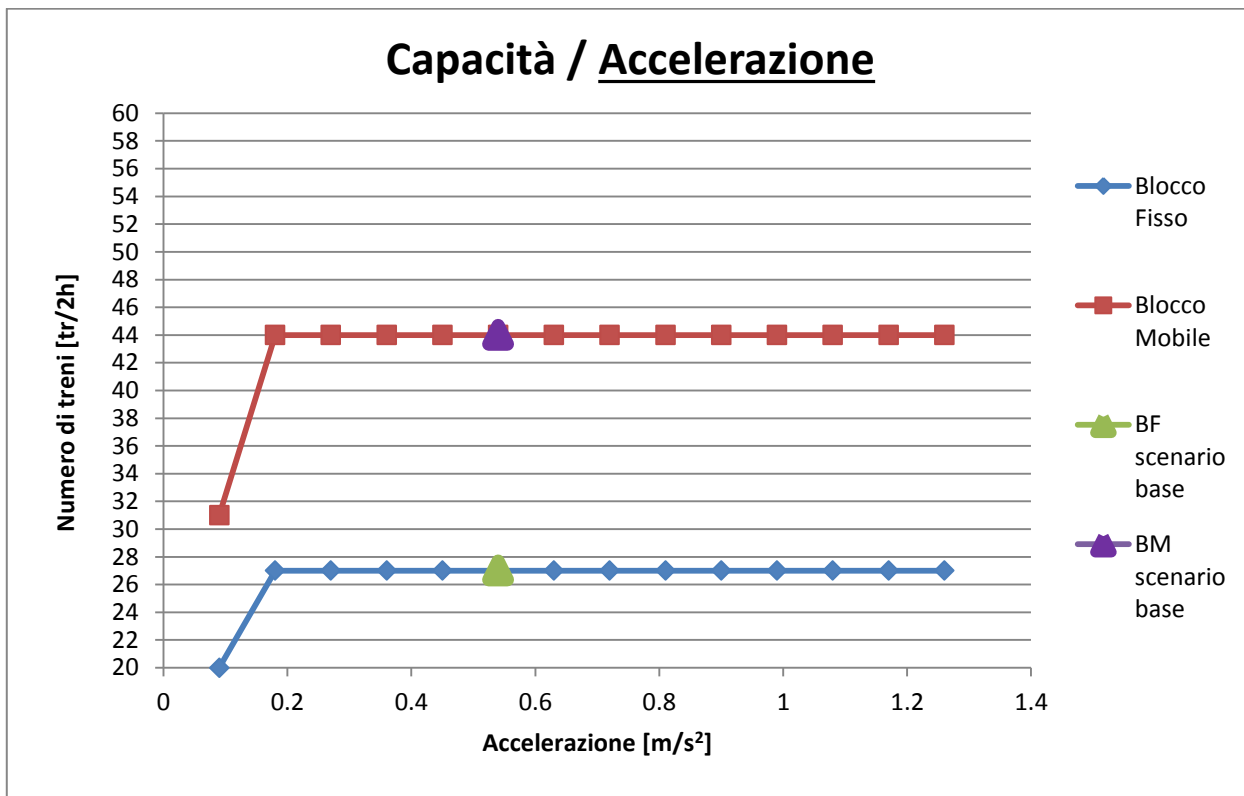


Grafico 7.2.17: Confronto al variare dell'accelerazione di servizio - linea AV

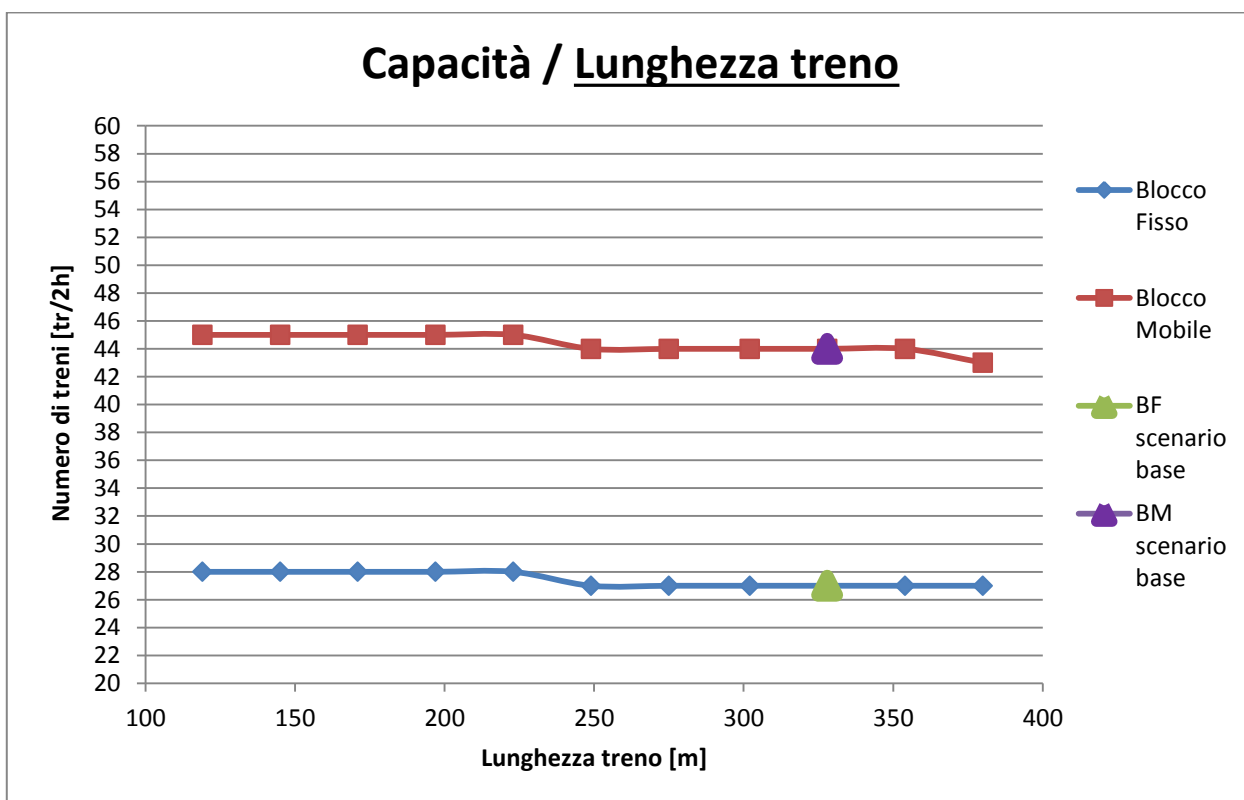


Grafico 7.2.18: Confronto al variare della lunghezza del treno - linea AV

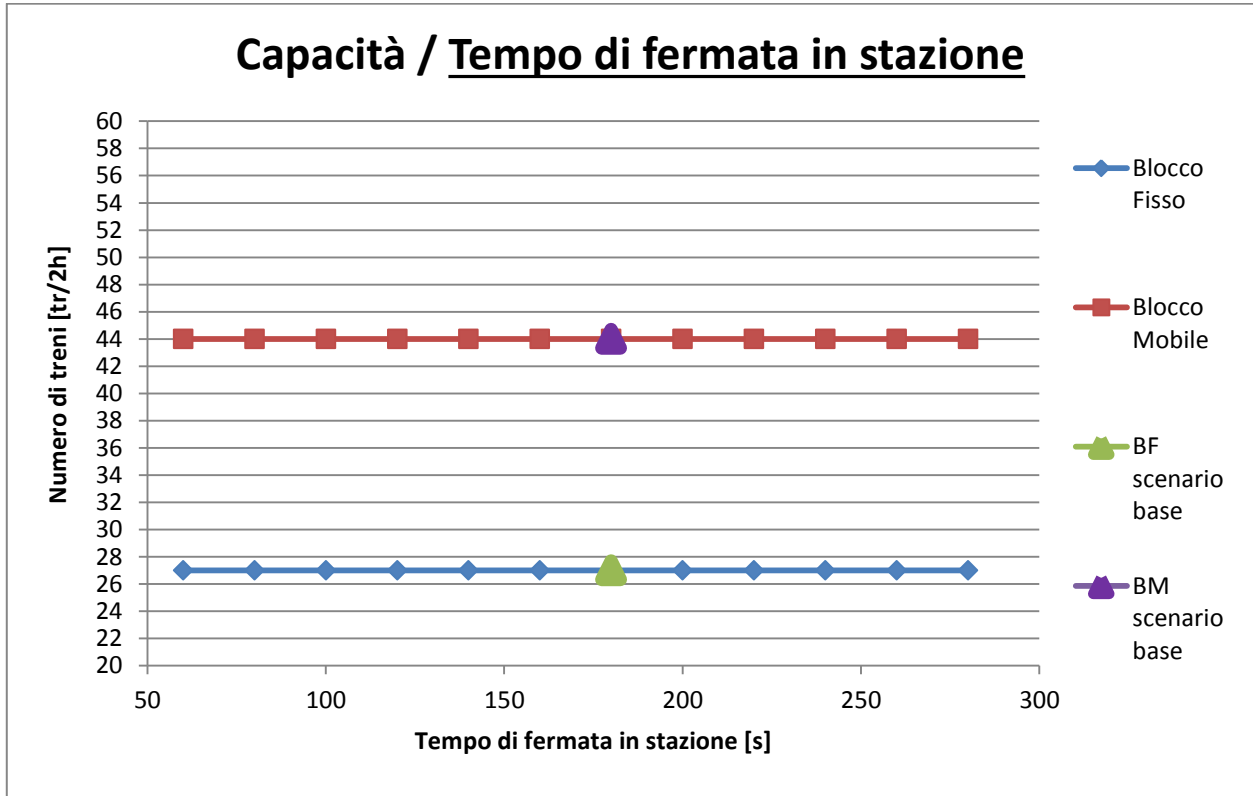


Grafico 7.2.19: Confronto al variare del tempo di fermata in stazione - linea AV

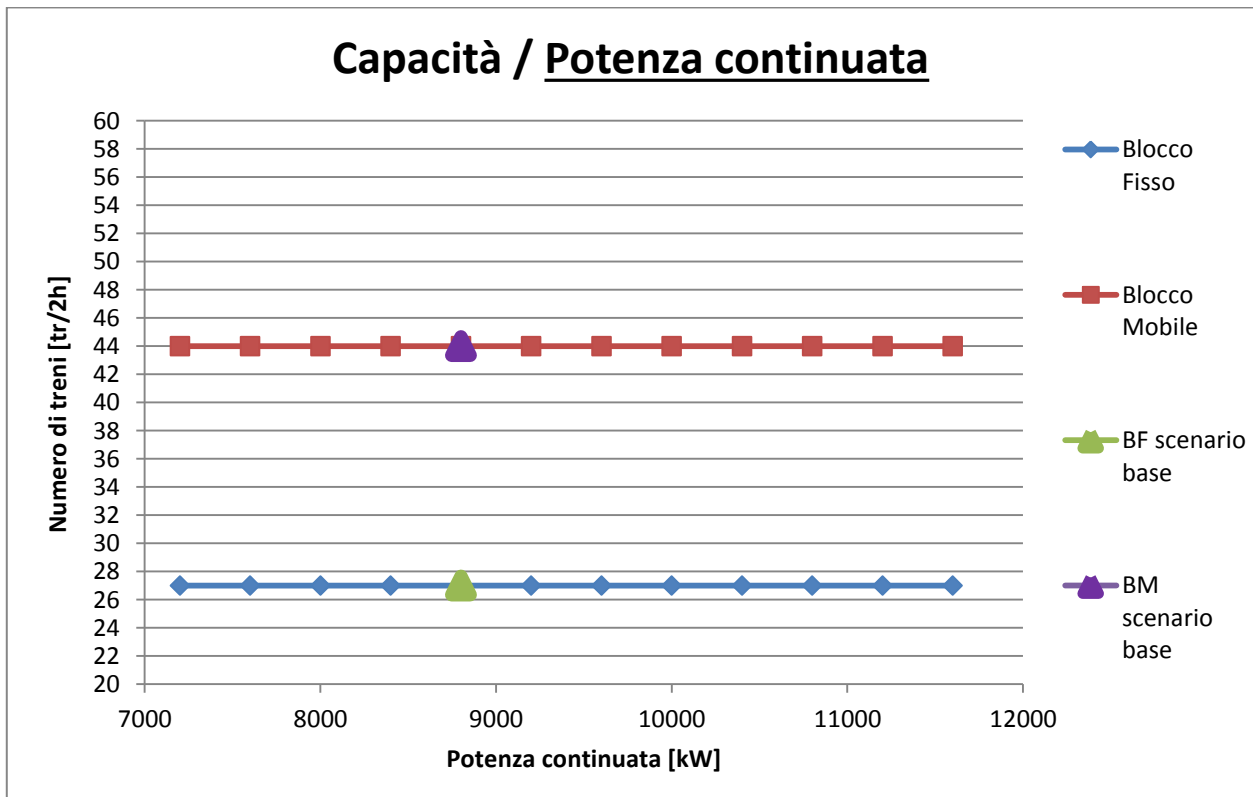


Grafico 7.2.20: Confronto al variare della potenza continuata - linea AV

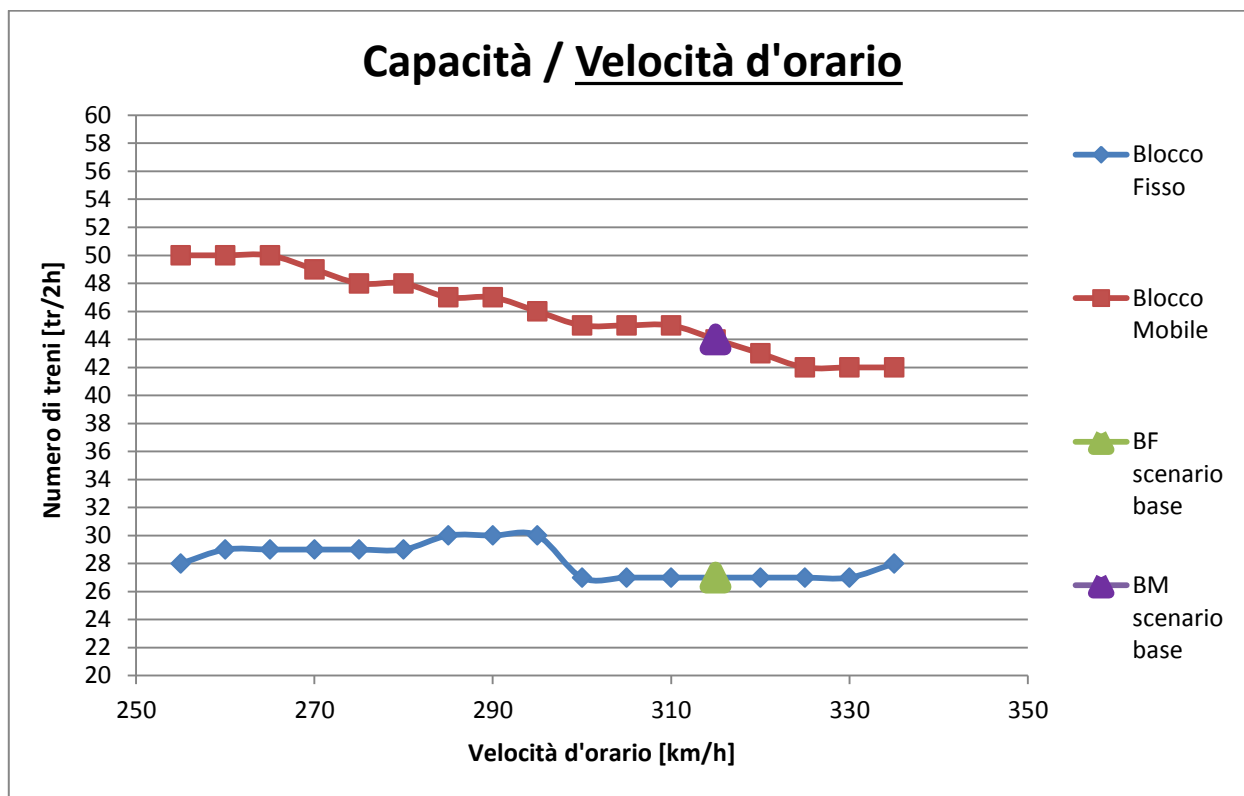


Grafico 7.2.21: Confronto al variare della velocità d'orario - linea AV

Dall'osservazione dei grafici precedenti si può confermare il risultato principale di questo studio della capacità: la situazione di base del Blocco Mobile è più vantaggiosa della situazione di base del Blocco Fisso. Si è già detto che il principale vantaggio del Blocco Mobile è quello di non avere sezioni e quindi di occupare l'infrastruttura per il minimo tempo indispensabile. Il guadagno di tempo che si ottiene come intervallo tra il passaggio di due treni si ripete per l'intera successione di treni (i treni sono dello stesso tipo ed effettuano lo stesso servizio).

Tra i vari parametri si nota come alcuni abbiano maggior importanza in un sistema rispetto all'altro: nel Blocco Fisso la variazione dei tempi tecnici non contribuisce così tanto come nell'altro sistema, perché l'occupazione di infrastruttura dovuta ai tempi tecnici è molto inferiore all'occupazione fisica della sezione. Con il Blocco Mobile invece il distanziamento è inferiore e i tempi tecnici hanno una valenza maggiore in proporzione.

Un fatto interessante è che, per entrambi i sistemi, la fase di partenza diviene critica per gli stessi valori di accelerazione (inferiore a 0.18 m/s^2). La variazione della lunghezza del treno ha pressoché lo stesso effetto su entrambi i distanziamenti.

Sull'andamento della capacità al variare della velocità si è già discusso nel paragrafo 7.2.1.8 e 7.2.2.7, qui si può vedere come nonostante il massimo numero di treni con il Blocco Fisso si abbia per velocità di 290 km/h, il minimo divario di capacità tra i due sistemi si ha per la massima velocità analizzata: 335 km/h (42 treni contro 28).

7.2.4 Potenziamiento del Blocco Fisso

Con l'utilizzo del Blocco Mobile è possibile far circolare 44 treni, quindi 17 treni in più rispetto al Blocco Fisso. Il confronto eseguito fin qui risponde alla domanda "quale dei due sistemi offre una maggiore potenzialità?". È noto tuttavia che le linee attuali siano gestite con il Blocco Fisso, quindi sorge spontaneo un quesito altrettanto importante: un certo grado di evoluzione dell'attuale sistema può comunque portare a prestazioni migliori? Eventualmente anche paragonabili al distanziamento a Blocco Mobile? La risposta alla prima domanda è ovviamente sì: si è commentato il fatto che la variazione di alcuni parametri potesse permettere la circolazione di un numero maggiore di treni.

Se si ipotizza di poter modificare i parametri analizzati nel distanziamento a Blocco Fisso, è interessante capire se tale sistema sia in grado di raggiungere la capacità del sistema in cui si è usato il distanziamento a Blocco Mobile del caso di base. Occorre stabilire quindi quali parametri variare contemporaneamente per ottenere il miglior risultato. Si escludono certamente dall'analisi potenza del motore e tempo di fermata. La lunghezza del treno non è cruciale ma una sua riduzione può essere d'aiuto, d'altronde con un numero elevato di treni l'offerta supera sicuramente l'attuale domanda di trasporto. Tutti gli altri parametri possono essere decisivi, ma tra di essi si esclude anche la variazione eccessiva del parametro "velocità di regime" in quanto esso è un importante indice del livello di servizio e partecipa in modo decisivo alla definizione del concetto più ampio di capacità.

Un fattore che finora non è stato messo in discussione è la distribuzione dei limiti di velocità: essa è stata dedotta, per i tre limiti più bassi dei sei, dalle norme NEAT valide in Italia [1]. È evidente che esse sottintendano un franco di sicurezza poiché quei limiti di velocità sono sempre inferiori alla velocità alla quale il treno si arresta entro il corrispondente numero di sezioni. Inoltre, derivando dalle NEAT, sono stati pensati per sezioni di blocco da 1'350 m, non ottimizzando così le sezioni delle linee ad alta velocità del caso base, lunghe 1'800 m.

Mantenendo le sezioni invariate possono essere scelti dei nuovi limiti riducendo il franco di sicurezza insito nei limiti stessi. Per non ridurre il livello di sicurezza di questa operazione è tuttavia necessario fare affidamento su tecnologie di distanziamento più moderne e affidabili di quelle attuali.

L'elenco che segue riporta i parametri che differiscono dalla situazione di base:

- Tempi tecnici = 10 s;
- Lunghezza del treno = 2 + 6 carrozze = 197 m;
- Velocità di regime = 285 km/h;
- nuovi limiti di velocità.

Sezioni libere	Limite di velocità [km/h]
1	50
2	170
3	240
4	290
5	330

Tabella 7.2.24: Limiti di velocità - linea AV - Blocco Fisso Potenziato

Si è fatto girare il programma per osservare il risultato ottenibile con questi nuovi parametri, dapprima singolarmente e infine tutti assieme. La seguente tabella riassume ciò che è stato ottenuto.

Intervento	Variazione	Massimo numero di treni/2ore
Tempi tecnici	20 s --> 10 s	29
Lunghezza del treno	2 + 11 carrozze --> 2 + 6 carrozze	28
Velocità d'orario	315 km/h --> 285 km/h	30
Limiti di velocità	NEAT --> nuovi	36
Interventi contemporanei	"le medesime in contemporanea"	43

Tabella 7.2.25: Contributo degli interventi eseguiti singolarmente e in contemporanea – linea AV – Blocco Fisso Potenziato

È possibile la pressoché uguaglianza tra il numero di treni prevedibili con un'applicazione base del Blocco Mobile ed una versione evoluta e potenziata del sistema a Blocco Fisso. Si analizzano ora i motivi di un risultato a prima vista così sorprendente.

La modifica riguardante i tempi tecnici è plausibile, le tecnologie utilizzate in ambito ferroviario nell'alta velocità per la trasmissione dei dati terra-treno sono le comunicazioni radio (con il Radio Block Center). Per quanto riguarda la situazione di partenza si erano assunti valori piuttosto cautelativi, con adeguati mezzi tecnologici e i necessari accorgimenti potrebbe essere raggiunta una più efficiente trasmissione ed elaborazione delle informazioni dimezzando i tempi assunti originariamente.

Dato che la domanda attualmente viene soddisfatta con un ridotto numero di treni, la ricerca dell'aumento del numero di treni è più un'esigenza di conoscere il limite di capacità che una reale necessità, si è quindi previsto di dimezzare all'incirca il numero di carrozze passeggeri.

L'imposizione di una velocità inferiore è invece il punto più discutibile: è evidente che così facendo si deteriora il livello di servizio. Se con una velocità di 315 km/h era possibile percorrere i 362 km di linea in meno di 1 ora e 20 minuti, passando ad una velocità massima di 285 km/h tale tragitto viene ultimato in 1 ora e 26 minuti. Si tratta comunque di un compromesso, ma in realtà la differenza sarà più bassa quando si considereranno tutti i cambiamenti assieme, perché la diminuzione della lunghezza dei treni permette di ridurre il peso del treno, accorciando il gap di percorrenza a soli 3 min (1 ora e 23 minuti di percorrenza).

Per ciò che attiene ai limiti di velocità, era indubbiamente comodo avere un parallelismo tra le NEAT, valide su tutte le linee tradizionali in Italia, e i limiti per l'alta velocità, ma ci si vuole ora vincolare da tale corrispondenza in modo da studiare nuovi scenari. Si sono scelti nuovi limiti, sempre nel rispetto dei criteri di sicurezza:

- i limiti scelti sono tali da permettere l'arresto entro il numero di sezioni corrispondente;
- si è considerato il fatto che il macchinista abbia il tempo di riconoscere l'autorità al movimento e ne prenda atto in un tempo pari a 3 secondi (così come avviene nella situazione di base);
- è stato previsto un ulteriore franco di sicurezza di circa 1 km tra il punto teorico di arresto e la fine della quarta sezione di blocco (poiché l'arresto a partire dalla massima velocità, con i limiti ora utilizzati, avviene in 4 sezioni di blocco). Tale franco è stato ridotto rispetto alla situazione di base in cui ammontava a 2 km (frenatura in 5 sezioni).

7.3 Linea Tradizionale

Sono stati eseguiti gli studi di capacità anche su linee più convenzionali, che sono tuttora in maggioranza in Italia e non solo. Di queste linee, dette anche "tradizionali", è stato schematizzato un modello rappresentativo, raffigurato di seguito.

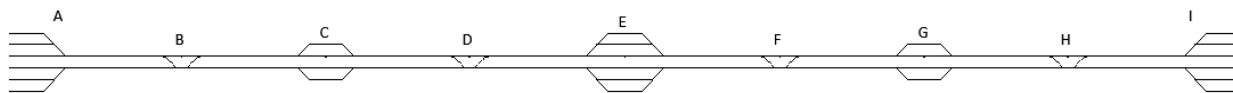


Figura 7.3.1: Schematizzazione della linea tradizionale

Velocità di tracciato	200 km/h
Velocità d'orario treno Suburbano	120 km/h
Velocità d'orario treno Eurocity	160 km/h
Lunghezza delle sezioni di blocco	1'350 m
Lunghezza delle banchine	400 m
Distanza tra due stazioni	5'400 m
Estensione della linea	43.2 km
Tipologie di treni circolanti	TSR; ETR 610

Tabella 7.3.1: Caratteristiche della linea tradizionale

Nell'orario di base sono stati previsti 6 treni/2ore. Le tipologie di treni circolanti sulle linee tradizionali sono numerose (da Eurocity a treni merci) e la frequenza con cui si susseguono l'una dall'altra è molto varia. Tenendo in considerazione lo scopo di questo lavoro, si è deliberatamente scelto di applicare il metodo di definizione della capacità non ad una successione di treni tipici di un orario di punta, ma ad un ristretto campione di treni dissimili tra loro. È stata considerata una successione regolare di treni Passanti ed Eurocity, alternati gli uni agli altri. Sono state considerate quindi le due tipologie di treni opposte tra loro (escludendo dall'analisi i treni merci, difficilmente previsti negli orari di punta). Ricordando che fin qui le analisi erano state compiute su orari con treni omotachici, la scelta compiuta nella linea tradizionale ha permesso di estremizzarne l'eterotachia e lo studio che se ne voleva effettuare.

Proprio a causa dell'eterotachia della linea, come si vedrà in seguito, per osservare delle percettibili variazioni nel numero di treni al variare dei parametri, è preferibile assumere una finestra temporale di almeno due ore.

In Italia, le linee tradizionali sono gestite con distanziamento a Blocco Fisso, con sezioni da 1'350 m. Con il segnalamento a due aspetti la velocità massima è di 140 km/h (la cui distanza di arresto è inferiore alla lunghezza delle sezioni), ma le linee sono state ormai dotate di sistemi come il B.A.C.C. con la ripetizione dei segnali in cabina, permettendo di innalzare a 180 km/h il limite di velocità con la ripetizione a 4 codici.

7.3.1 Blocco Fisso

Il Blocco Fisso considerato nel caso di base prevede sezioni di blocco concatenate da 1'350 m. Le sezioni che devono rimanere libere tra un treno ed il successivo variano a seconda della velocità. Si è quindi scelto di attribuire un limite di velocità in funzione delle sezioni libere disponibili, nel caso di base sono stati adottati i limiti previsti da RFI con la ripetizione a 4 codici [3]. Quando un treno entra in una sezione di blocco, esso dovrà regolare le velocità in funzione del numero di sezioni libere antistanti in modo che sia possibile il completo arresto entro l'ultima sezione disponibile. I limiti adottati nel presente lavoro sono i seguenti.

Sezioni libere	Limite di velocità [km/h]
1	50
2	110
3	180

Tabella 7.3.2: Limiti di velocità - Linea tradizionale

Questo tipo di distanziamento può essere rappresentativo anche di una linea ferroviaria predisposta per lo standard ERTMS L2, dove il treno riceve un'Autorizzazione al Movimento da parte del Radio Block Center che gli fornisce la velocità obiettivo relativa alla sezione di blocco in cui si trova il treno. Qualora il treno varchi una sezione di blocco con una velocità superiore a quella consentita, il macchinista dovrà rallentare per adeguare la velocità al limite.

Nel caso non lo facesse, il sistema di controllo della velocità interviene con la frenatura di emergenza. Sulle reti italiane dotate di SSC o SCMT, tale frenatura entra automaticamente in azione se il macchinista non riconosce il limite di velocità più restrittivo entro 3 secondi.

Nel seguente paragrafo sono stati utilizzati i codici di calcolo basati sugli algoritmi di Figura 6.2.1, Figura 6.3.1, Figura 6.4.1 e Figura 6.4.2.

7.3.1.1 Situazione attuale

Per lo scenario di base sono stati considerati i seguenti tempi tecnici.

Tempo per la formazione dell'itinerario [s]	10
Tempo per il rilascio dell'itinerario [s]	10
<i>Tempo tecnico totale [s]</i>	<i>20</i>

Tabella 7.3.3: Tempi tecnici – linea tradizionale – Blocco Fisso

In questo caso i tempi tecnici sono costituiti dal tempo di rilevamento e trasmissione dati di liberazione della sezione di blocco da parte del treno precedente (e conseguente elaborazione dell'informazione) e dal tempo di rilevamento e trasmissione dati di occupazione della sezione di blocco da parte del treno che segue (e conseguente elaborazione dell'informazione). Non è stato considerato il tempo di reazione del macchinista poiché esso non influisce sul minimo distanziamento a marcia indisturbata: il macchinista ha tre secondi di tempo, una volta ricevuto un limite di velocità più restrittivo, per riconoscere la prescrizione.

Dall'analisi dell'orario grafico originale e procedendo con il processo di compressione, si è pervenuti ai seguenti risultati:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	66.7
Tempo di sicurezza [min]	22.1
Capacità inutilizzata [min]	31.0
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	55.6 %
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	18.5 %
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	25.9 %
Treni nella finestra temporale	6
Velocità media Suburbano [km/h]	72 km/h
Velocità media Eurocity [km/h]	148 km/h
Consumo di capacità [%]	73.7 %
Stabilità	44.0 %
Eterogeneità	50 %

Tabella 7.3.4: Risultati della compressione dell'orario originale – linea tradizionale – Blocco Fisso

Dall'analisi è stato ricavato innanzitutto il tempo di occupazione dell'infrastruttura (66.7 min) nell'arco della finestra temporale. L'UIC, per linee tradizionali nell'ora di picco, consiglia un tetto massimo di occupazione dell'infrastruttura pari al 75% della finestra temporale considerata, si deduce che è ritenuto sufficiente un margine pari al 25%. Basandosi su queste indicazioni dell'UIC,

si è deciso di mantenere, nelle analisi eseguite, lo stesso rapporto tra tempo di occupazione e margini. Pertanto, essendo l'occupazione di infrastruttura pari in questo caso al 56% della finestra di tempo, si riserva il 19% per i margini di tempo; ne consegue che il 26% di tempo residuo consista in capacità inutilizzata. Di seguito verrà portato a termine il metodo di compattazione esposto nell'UIC CODE 406 inserendo nuovi treni fino a massima saturazione possibile della capacità inutilizzata.

Procedendo con la compressione dell'orario grafico si nota la possibilità di inserire ulteriori tracce orario. Arrivando alla saturazione dell'orario, si sono ottenuti i seguenti valori:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	89.0
Tempo di sicurezza [min]	29.7
Capacità inutilizzata [min]	1.4
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	74.1 %
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	24.7 %
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	1.2 %
Treni nella finestra temporale	8
Velocità media Suburbano [km/h]	72 km/h
Velocità media Eurocity [km/h]	148 km/h
Consumo di capacità [%]	98.8 %
Stabilità	25.9 %
Eterogeneità	50 %

Tabella 7.3.5: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea tradizionale – Blocco Fisso

Dalla compressione dell'orario si nota come è possibile aumentare il numero di treni/ora previsti dall'orario originale. In particolare potrebbero essere inseriti nell'orario 2 treni aggiuntivi, garantendo comunque i margini previsti dall'UIC. La compressione di un traffico così eterotachico comporta una non perfetta compattazione delle tracce: rimangono dei vuoti nell'orario tra una traccia e l'altra, che non possono essere sfruttati, pertanto il numero di treni circolanti è sensibilmente inferiore rispetto al caso di circolazione omotachica. Si nota dal grafico in allegato di come sia possibile avvicinare due tracce successive o solo nella zona iniziale di linea o soltanto in quella finale.

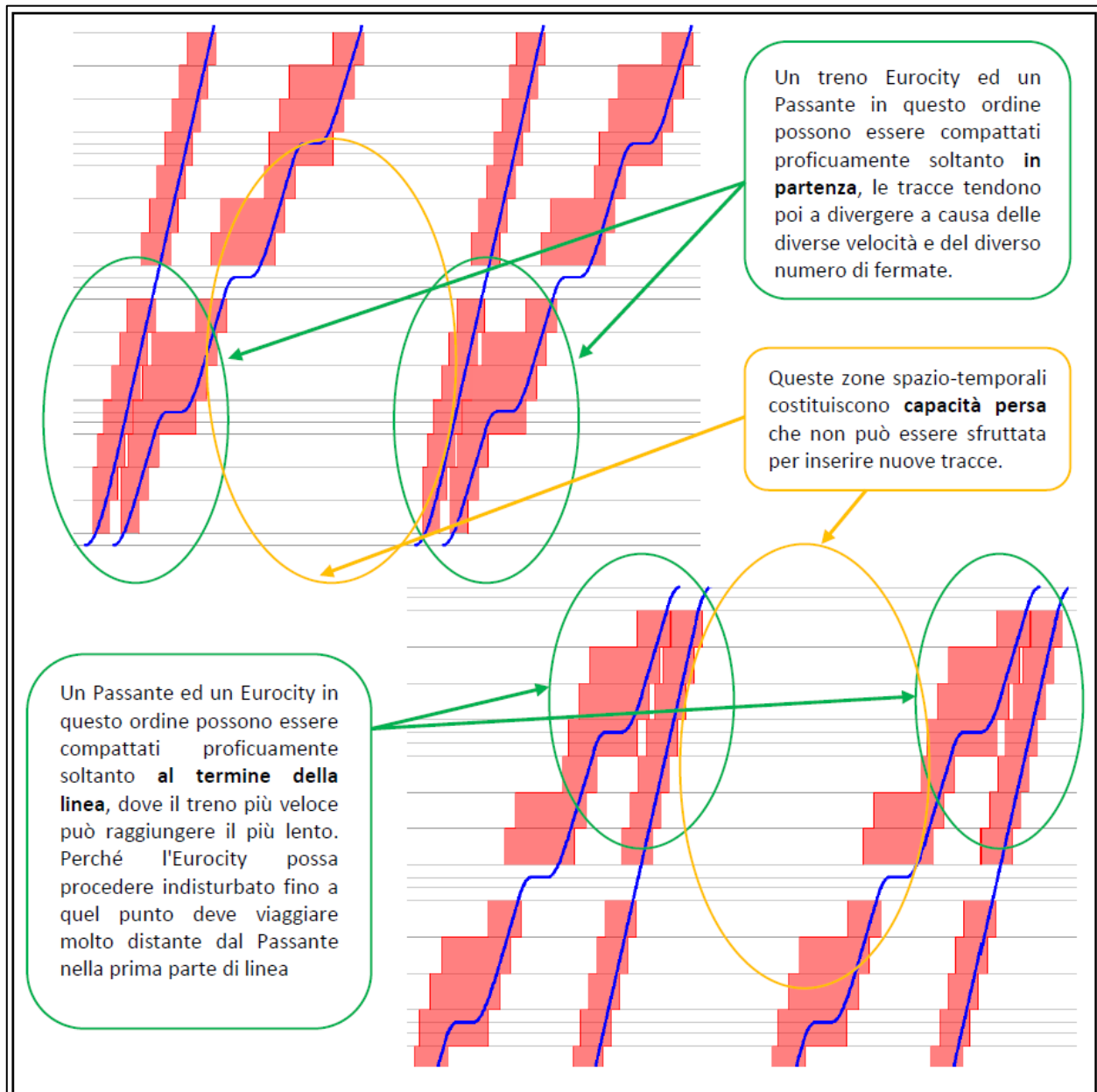


Figura 7.3.2: Compattazione delle tracce - linea tradizionale - Blocco Fisso

Si riporta l'elenco di parametri che sono stati fatti variare per osservare quali hanno una maggiore o minore influenza sulla capacità intesa come numero massimo di treni/ora prevedibili. Ad essi viene affiancato il loro valore nel caso di base.

Tempi tecnici [s]	20
Accelerazione di servizio [m/s^2]	0.54
Lunghezza del Suburbano [m]	131
Lunghezza dell'Eurocity [m]	175

Tempo di fermata in stazione [s]	60
Lunghezza delle sezioni di blocco [m]	1'350
Potenza del Suburbano [kW]	3'400
Potenza dell'Eurocity [kW]	5'520
Massima velocità d'orario del Suburbano [km/h]	120
Massima velocità d'orario dell'Eurocity [km/h]	160
Limiti di velocità [km/h]	50; 110; 180; 250; 300; 340
Differenza tra le velocità dei due treni [km/h]	40
Distanza tra due posti di precedenza [km]	43.2

Tabella 7.3.6: Parametri considerati e loro valore nel caso di base – linea tradizionale – Blocco Fisso

Di seguito si analizzano i risultati di capacità al variare dei parametri considerati.

7.3.1.2 Tempi tecnici

Nello scenario attuale si ha un totale di tempi tecnici di 20 s.

Eseguendo il metodo di compattazione per i diversi valori considerati (mantenendo invariati gli altri parametri), si ottengono i seguenti risultati. Con la sigla **T/O** si indica il numero di treni/ora, con **T.O.I.** il tempo di occupazione dell'infrastruttura, con **T.S.** il tempo di sicurezza e con **C.I.** la capacità inutilizzata.

Tempi tecnici [s]	<u>0</u>	<u>4</u>	<u>8</u>	<u>12</u>	<u>16</u>	<u>20</u>	<u>24</u>	<u>28</u>	<u>32</u>	<u>36</u>	<u>40</u>
T/O	8	8	8	8	8	8	8	7	7	7	7
T.O.I. [min]	86.3	86.8	87.4	87.9	88.4	89.0	89.5	72.0	72.5	72.9	73.4
T.S. [min]	28.8	28.9	29.1	29.3	29.5	29.7	29.8	24.0	24.2	24.3	24.5
C.I. [min]	4.9	4.2	3.5	2.8	2.1	1.4	0.7	24.0	23.4	22.8	22.1
% T.O.I. [%]	71.9%	72.4%	72.8%	73.2%	73.7%	74.1%	74.6%	60.0%	60.4%	60.8%	61.2%
% T.S. [%]	24.0%	24.1%	24.3%	24.4%	24.6%	24.7%	24.9%	20.0%	20.1%	20.3%	20.4%
% C.I. [%]	4.1%	3.5%	2.9%	2.3%	1.7%	1.2%	0.6%	20.0%	19.5%	19.0%	18.4%

Tabella 7.3.7: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea tradizionale - Blocco Fisso

In questo grafico si evidenzia il legame tra i tempi tecnici ed il massimo numero di treni prevedibili nell'orario.

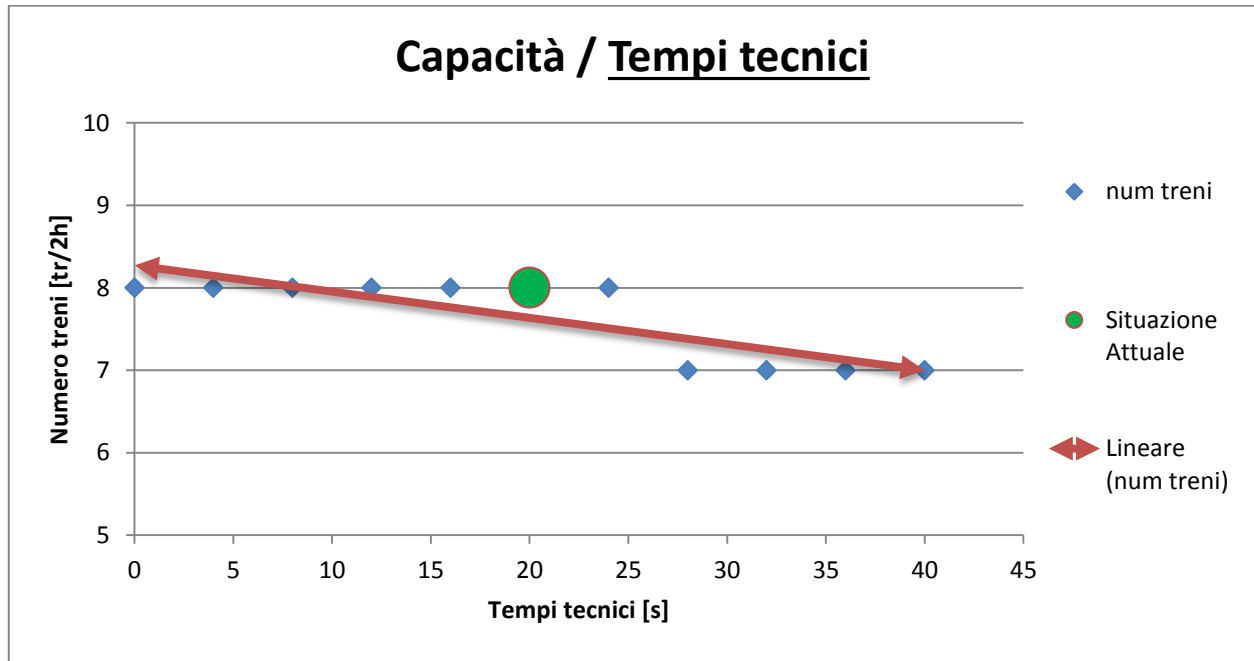


Grafico 7.3.1: Legame tra tempi tecnici e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

Ancora una volta si ottiene che all'aumentare dei tempi tecnici diminuisce la capacità della linea, poiché aumenta l'occupazione di infrastruttura del singolo treno.

Questo parametro ha qui un'influenza molto inferiore rispetto alla linea suburbana. Si osserva, infatti, che la sua variazione non è accompagnata da una differenza elevata di treni/ora. Questa considerazione varrà per tutti i parametri: in una linea eterotachica il fattore che condiziona maggiormente la capacità è la differenza di velocità tra i treni circolanti, se non si interviene su questo punto non è possibile ottenere grandi variazioni di treni/ora.

7.3.1.3 Accelerazione di servizio

Nello scenario attuale si è considerata un'accelerazione di servizio pari a 0.54 m/s^2 . Questo dato è comunque variabile a seconda delle linee, delle prestazioni del materiale rotabile e delle esigenze di orario, pertanto si è scelto di valutare la capacità nelle situazioni seguenti.

% acc. di servizio	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%
Acc. di servizio [m/s ²]	<u>0.18</u>	<u>0.27</u>	<u>0.36</u>	<u>0.45</u>	0.54	<u>0.63</u>	<u>0.72</u>	<u>0.81</u>	<u>0.9</u>	<u>0.99</u>	<u>1.08</u>	<u>1.17</u>	<u>1.26</u>
T/20	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9
T.O.I. [min]	87.5	81.4	75.9	72.9	89.0	87.5	86.4	89.9	89.4	89.0	88.6	88.4	88.2

T.S. [min]	29.2	27.1	25.3	24.3	29.7	29.2	28.8	30.0	29.8	29.7	29.5	29.5	29.4
C.I. [min]	3.4	11.4	18.8	22.8	1.4	3.4	4.7	0.1	0.8	1.4	1.8	2.2	2.4
% T.O.I. [%]	72.9 %	67.9 %	63.2 %	60.7 %	74.1 %	72.9 %	72.0 %	74.9 %	74.5 %	74.1 %	73.9 %	73.6 %	73.5 %
% T.S. [%]	24.3 %	22.6 %	21.1 %	20.2 %	24.7 %	24.3 %	24.0 %	25.0 %	24.8 %	24.7 %	24.6 %	24.5 %	24.5 %
% C.I. [%]	2.8%	9.5%	15.7 %	19.0 %	1.2%	2.8%	4.0%	0.1%	0.7%	1.2%	1.5%	1.8%	2.0%

Tabella 7.3.8: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea tradizionale - Blocco Fisso

Di seguito si può osservare il legame tra accelerazione e capacità, intesa come numero di treni circolanti.

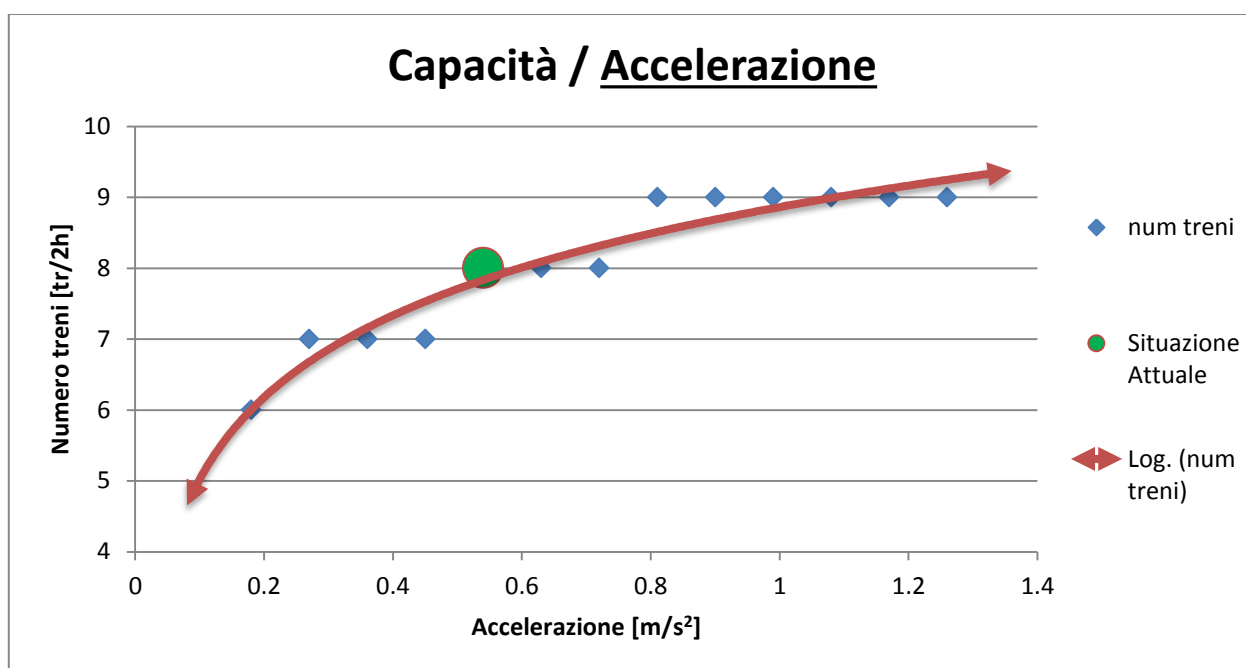


Grafico 7.3.2: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

La capacità risulta crescente con l'accelerazione di servizio, tuttavia il legame non è lineare. L'aumento del valore di accelerazione a partire da quello attuale ha benefici ridotti, invece la sua diminuzione porta ad un decadimento più rapido della capacità.

7.3.1.4 Lunghezza del treno

Come nei casi precedenti, nelle linee reali possono circolare treni con diverse composizioni e lunghezze, pertanto si considerano ulteriori possibilità. Dato che sono state previste banchine lunghe 400 metri, questo costituisce un limite massimo per la lunghezza dei treni. La lunghezza dei due convogli è stata fatta variare incrementandola o decrementandola di una carrozza alla volta rispetto alla composizione di base.

Incremento del numero di carrozze	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Lunghezza del Suburbano [m]	<u>78.9</u>	<u>105.0</u>	<u>131.0</u>	<u>157.0</u>	<u>183.0</u>	<u>209.0</u>	<u>235.1</u>	<u>261.1</u>
Lunghezza dell'Eurocity [m]	<u>133.9</u>	<u>160.6</u>	<u>187.4</u>	<u>214.2</u>	<u>240.9</u>	<u>267.7</u>	<u>294.5</u>	<u>321.3</u>
Massa in servizio del Suburbano [t]	210	278	346	414	482	550	618	686
Massa in servizio dell'Eurocity [t]	321	386	450	514	579	643	707	771
T/20	8	8	8	7	7	7	7	7
T.O.I. [min]	87.6	88.1	89.0	72.1	73.2	74.6	75.7	77.4
T.S. [min]	29.2	29.4	29.7	24.0	24.4	24.9	25.2	25.8
C.I. [min]	3.2	2.6	1.4	23.9	22.3	20.5	19.1	16.8
% T.O.I. [%]	73.0%	73.4%	74.1%	60.0%	61.0%	62.2%	63.1%	64.5%
% T.S. [%]	24.3%	24.5%	24.7%	20.0%	20.3%	20.7%	21.0%	21.5%
% C.I. [%]	2.7%	2.2%	1.2%	19.9%	18.6%	17.1%	15.9%	14.0%

Tabella 7.3.9: Risultati al variare della lunghezza del treno - linea tradizionale - Blocco Fisso

La rappresentazione grafica è la seguente.

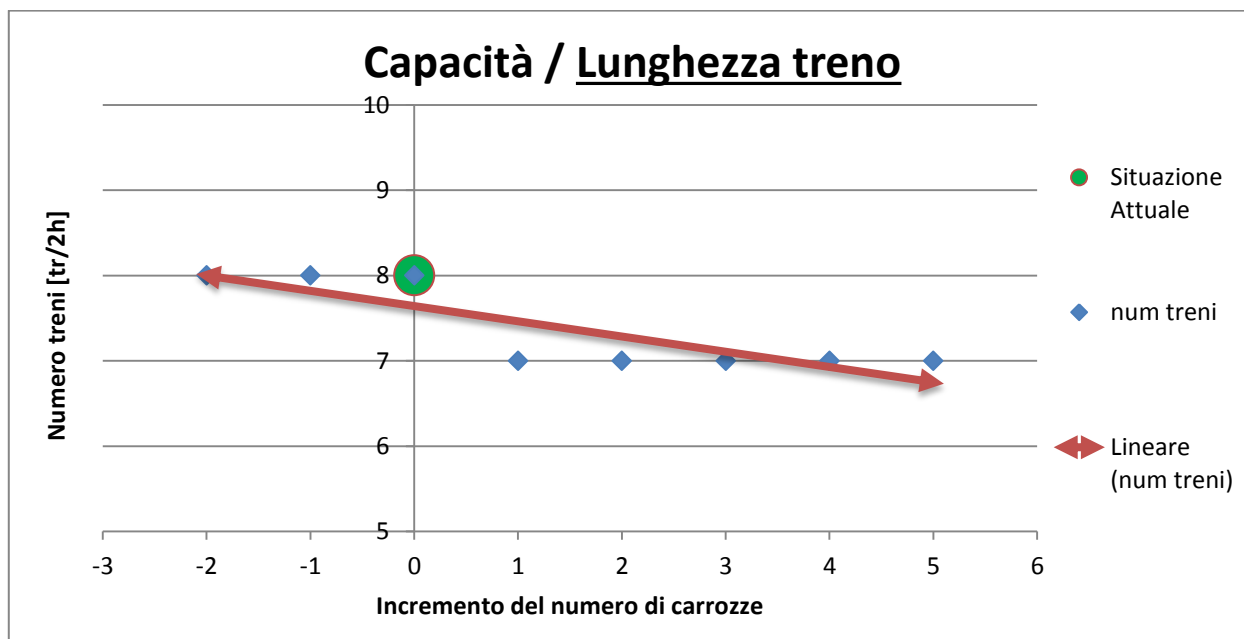


Grafico 7.3.3: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

Questo parametro ha una scarsa incidenza in quanto, nel calcolo della capacità, interviene principalmente nel tempo di liberazione, che è esiguo rispetto al tempo di percorrenza della sezione e del tempo di approccio, che rimangono invariati. Pertanto tra i due casi estremi considerati la variazione è soltanto di 1 treno/2ore.

Il secondo effetto della diminuzione della lunghezza del treno è la riduzione di peso, che permette una minore lunghezza dei tratti di accelerazione. Questo si verifica solo per il treno Eurocity, che ha potenza concentrata, tuttavia tale effetto è limitato all'unica accelerazione che esso compie. Invece, per il treno Suburbano, le prestazioni rimangono costanti grazie alla non variazione del rapporto peso/potenza.

7.3.1.5 Tempo di fermata

Sono stati considerati vari tempi di fermata in stazione fino ad un massimo di 3 minuti.

Tempo di fermata [s]	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>120</u>	<u>140</u>	<u>160</u>	<u>180</u>
T/20	11	10	9	8	7	7	6	5	5	5
T.O.I. [min]	79.5	87.9	83.6	89.0	78.4	85.7	87.7	68.8	73.8	78.8
T.S. [min]	26.5	29.3	27.9	29.7	26.1	28.6	29.2	22.9	24.6	26.3
C.I. [min]	13.9	2.8	8.5	1.4	15.5	5.7	3.0	28.2	21.6	14.9
% T.O.I. [%]	66.3%	73.2%	69.7%	74.1%	65.3%	71.4%	73.1%	57.4%	61.5%	65.7%
% T.S. [%]	22.1%	24.4%	23.2%	24.7%	21.8%	23.8%	24.4%	19.1%	20.5%	21.9%
% C.I. [%]	11.6%	2.4%	7.1%	1.2%	12.9%	4.7%	2.5%	23.5%	18.0%	12.4%

Tabella 7.3.10: Risultati al variare del tempo di fermata - linea tradizionale - Blocco Fisso

Il grafico presenta l'andamento della capacità.

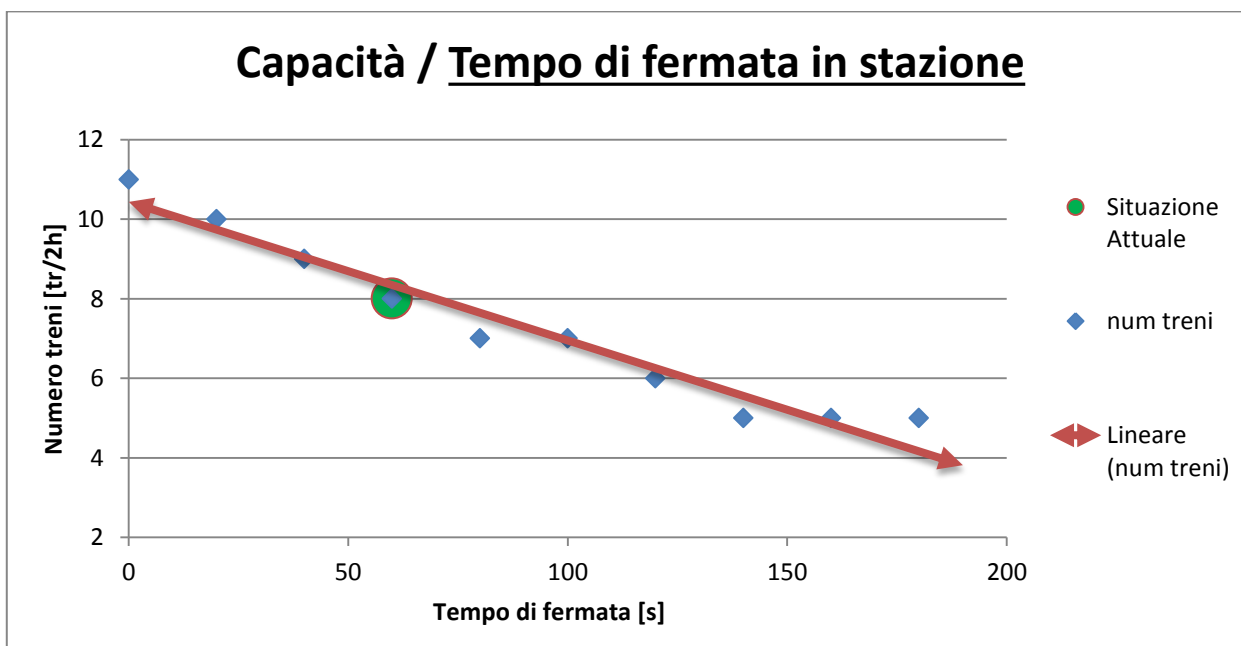


Grafico 7.3.4: Legame tra tempo di fermata in stazione e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

Il tempo di fermata è un parametro di primaria importanza. Questo deriva dal fatto che la linea è eterotachica, in particolare ciò che differenzia le due tipologie di treni non è soltanto la loro velocità massima, ma anche il tipo di servizio svolto. Si sono considerati due servizi diametralmente opposti: il Suburbano effettua servizio viaggiatori in ogni stazione, mentre l'Eurocity non effettua alcuna fermata intermedia. Ciò contribuisce a rendere ulteriormente più lenta la traccia del treno Suburbano. Riducendone il tempo di fermata è possibile ottenere un aumento nel numero di treni, viceversa si ha un decadimento altrettanto netto di capacità.

7.3.1.6 Lunghezza delle sezioni di blocco

I limiti di velocità assunti, abbinati a sezioni di blocco da 1'350 m, assicurano un franco totale all'arresto di circa 800 m per un treno viaggiante a 180 km/h. Infatti, assumendo una decelerazione costante di 0,77 m/s², il treno potrebbe arrestarsi in 1'624 m, a cui va sommato lo spazio percorso dal treno a velocità costante durante il tempo di reazione del macchinista, mentre due sezioni di blocco libere garantiscono almeno 2'700 m di spazio libero. Si sono analizzate differenti lunghezze delle sezioni di blocco mantenendo invariata la lunghezza della linea, il numero delle stazioni e la distanza interstazionale, facendo variare il suddetto franco di sicurezza, calcolato sulla distanza di arresto di un treno viaggiante a velocità pari al limite massimo di velocità previsto dai codici (180 km/h).

Lunghezza delle sezioni di blocco [m]	900	1'080	1'350	1'800
Franco di sicurezza [m]	163 ¹	252	792	1'692
T/20	9	8	8	7
T.O.I. [min]	89.1	86.8	89.0	74.5
T.S. [min]	29.7	28.9	29.7	24.8
C.I. [min]	1.3	4.3	1.4	20.7
% T.O.I. [%]	74.2%	72.3%	74.1%	62.1%
% T.S. [%]	24.7%	24.1%	24.7%	20.7%
% C.I. [%]	1.1%	3.6%	1.2%	17.3%

Tabella 7.3.11: Risultati al variare della lunghezza delle sezioni di blocco - linea tradizionale - Blocco Fisso

La rappresentazione dei risultati ottenuti è mostrata nel seguente grafico.

¹ Il franco di sicurezza è stato qui eccezionalmente calcolato rispetto alla velocità massima dell'Eurocity nel caso di base (160 km/h). Tale velocità costituirebbe anche il limite massimo di velocità corrispondente a 3 sezioni libere nel caso di blocchi da 900 m.

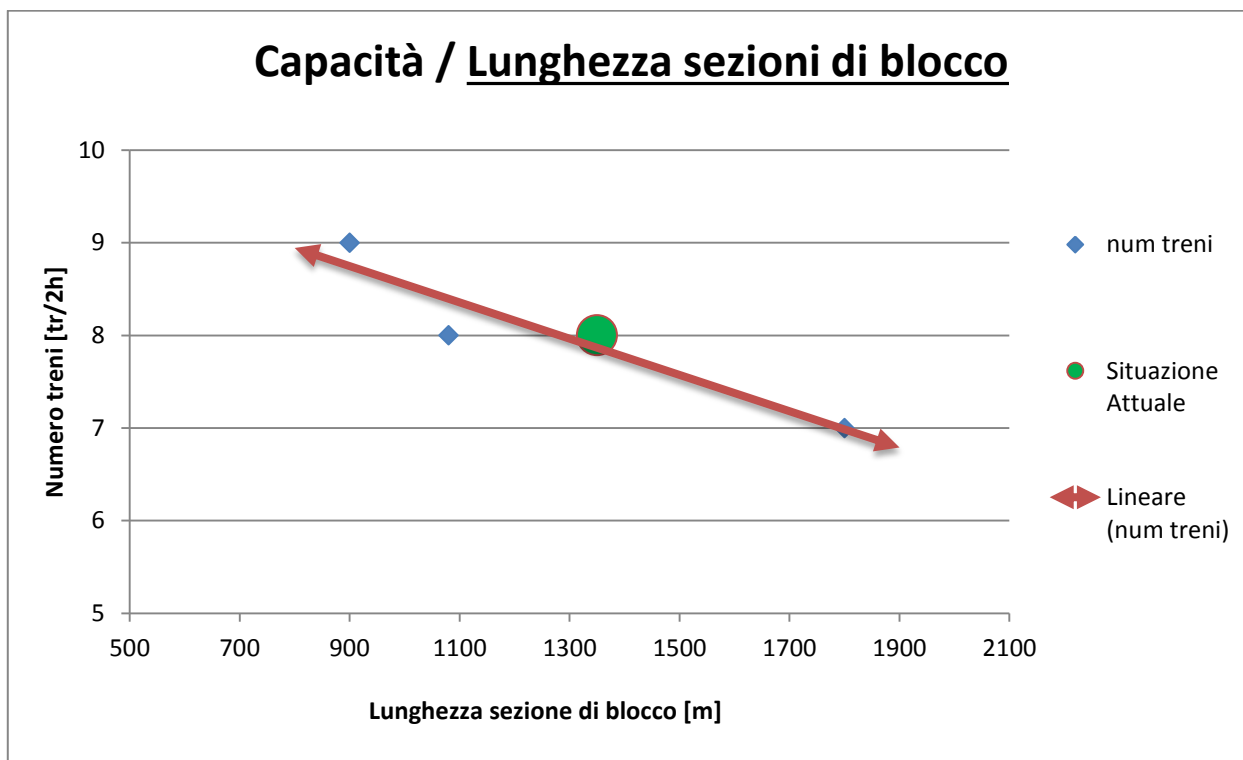


Grafico 7.3.5: Legame tra lunghezza delle sezioni di blocco e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

Il legame tra numero di treni/ora e lunghezza delle sezioni di blocco è inversamente proporzionale. La variazione del numero di treni non è elevata, si passa da 7 treni/2ore per sezioni da 1'800 m a 9 treni/2ore per sezioni 900 metri. Aumentando la lunghezza, le sezioni di blocco non sono ottimizzate rispetto ai limiti di velocità ed in particolare risultano troppo bassi. Se si volessero utilizzare sezioni di lunghezza diversa, occorrerebbe ripensare le velocità obiettivo in modo da ottimizzarle rispetto alla lunghezza delle sezioni. In generale comunque, sezioni più lunghe restano occupate per più tempo e riducono la capacità. Sezioni più corte sono più vantaggiose per la capacità ma complicano la gestione del distanziamento.

È comunque vantaggioso l'utilizzo di sezioni di blocco più corte della distanza di arresto e di limiti di velocità a seconda del numero di blocchi liberi. Tuttavia in alcuni casi tale vantaggio può non essere adeguatamente sfruttato. Nella fattispecie il treno Suburbano ha una velocità massima di poco superiore al secondo limite di velocità (120 km/h contro 110 km/h), ne consegue che a regime necessita di due sezioni libere (2'700 m) oltre a quella in cui si trova (per un totale di 4'050 m), a fronte di uno spazio di arresto di 721 m. Ci si è quindi chiesti se lo svantaggio di avere sezioni più lunghe (da 1'800 m) ma due soli limiti di velocità (50 km/h e 180 km/h) potesse razionalizzare meglio l'occupazione di infrastruttura. A 120 km/h le sezioni occupate sarebbero 2

(una libera più quella occupata) per un totale di 3'600 m. È stata quindi eseguita una prova con il software, dalla quale si è ottenuta una capacità identica al caso di base (8 treni/2ore) ed un'occupazione infrastrutturale pressoché identica (88 minuti contro 89). Si è però implicitamente abbassato il franco di sicurezza a soli 30 m per un treno viaggiante alla velocità pari al limite massimo. Pertanto, nel complesso, la scelta di differenziare i limiti di velocità adottando sezioni più corte appare ancora una volta vincente (in questo caso permette identiche prestazioni ma con un livello di sicurezza maggiore).

7.3.1.7 Potenza continuata

Le possibilità offerte sul mercato dei materiali rotabili sono numerose, pertanto si osserva come varia la capacità nel caso di utilizzo di treni con motori di diversa potenza.

Variazione rispetto al caso di base	-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	0%	+10%	+20%	+30%	+40%	+50%
Potenza cont. del Suburbano [kW]	<u>1'700</u>	<u>2'040</u>	<u>2'380</u>	<u>2'720</u>	<u>3'060</u>	<u>3'400</u>	<u>3'740</u>	<u>4'080</u>	<u>4'420</u>	<u>4'760</u>	<u>5'100</u>
Potenza cont. dell'Eurocity [kW]	<u>2'760</u>	<u>3'312</u>	<u>3'864</u>	<u>4'416</u>	<u>4'968</u>	<u>5'520</u>	<u>6'072</u>	<u>6'624</u>	<u>7'176</u>	<u>7'728</u>	<u>8'280</u>
T/20	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
T.O.I. [min]	76.9	74.6	73.3	72.3	89.6	89.0	88.5	88.2	88.0	87.9	87.8
T.S. [min]	25.6	24.9	24.4	24.1	29.9	29.7	29.5	29.4	29.3	29.3	29.3
C.I. [min]	17.5	20.5	22.2	23.6	0.6	1.4	2.0	2.3	2.6	2.8	2.9
% T.O.I. [%]	64.1%	62.2%	61.1%	60.2%	74.6%	74.1%	73.8%	73.5%	73.4%	73.2%	73.2%
% T.S. [%]	21.4%	20.7%	20.4%	20.1%	24.9%	24.7%	24.6%	24.5%	24.5%	24.4%	24.4%
% C.I. [%]	14.6%	17.1%	18.5%	19.7%	0.5%	1.2%	1.6%	2.0%	2.2%	2.3%	2.4%

Tabella 7.3.12: Risultati al variare della potenza continuata - linea tradizionale - Blocco Fisso

La situazione è piuttosto stazionaria al variare del parametro potenza.

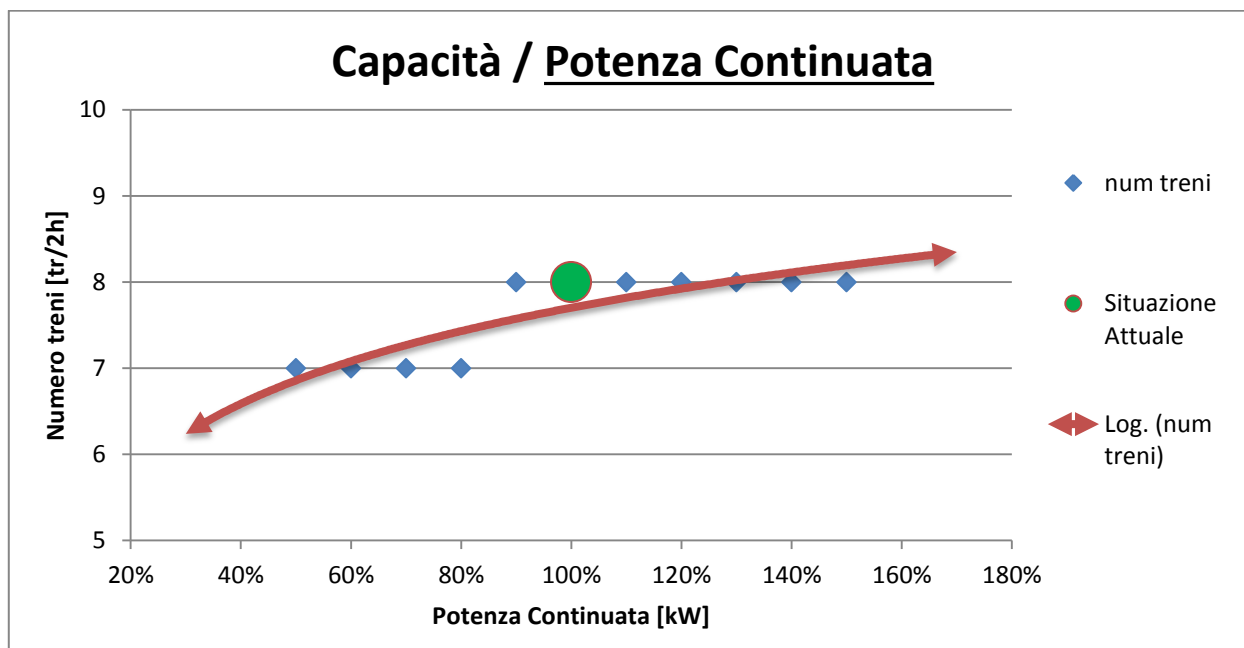


Grafico 7.3.6: Legame tra potenza continuata e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

All'aumentare della potenza, è possibile sfruttare accelerazioni maggiori e quindi ridurre i tempi di occupazione. Questo, a differenza della linea suburbana, avviene poiché le velocità sono alte e ricadono nella zona di caratteristica meccanica limitata dalla massima potenza costante consentita. Tuttavia l'incremento di potenza non porterebbe ad alcun beneficio in termini di aumento di treni/ora mentre una riduzione di potenza del materiale rotabile comporterebbe una perdita, se pur lieve, di capacità.

7.3.1.8 Velocità d'orario

Di seguito si riportano i risultati al variare delle velocità d'orario considerate. Sono state fatte variare le due velocità delle stesse quantità in modo tale da non modificare la differenza tra di esse e, quindi, mantenere lo stesso grado di eterotachia del traffico.

Velocità d'orario del Suburbano [km/h]	<u>90</u>	<u>96</u>	<u>102</u>	<u>108</u>	<u>114</u>	<u>120</u>	<u>126</u>	<u>132</u>	<u>138</u>	<u>141</u>
Velocità d'orario dell'Eurocity [km/h]	<u>129</u>	<u>135</u>	<u>141</u>	<u>147</u>	<u>153</u>	<u>159</u>	<u>165</u>	<u>171</u>	<u>177</u>	<u>180</u>
Incremento di velocità rispetto a quella base [km/h]	-30	-24	-18	-12	-6	0	6	12	18	21
T/20	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8

T.O.I. [min]	76.0	73.9	72.3	89.8	89.8	89.0	88.5	88.3	88.3	88.4
T.S. [min]	25.3	24.6	24.1	29.9	29.9	29.7	29.5	29.4	29.4	29.5
C.I. [min]	18.7	21.5	23.6	0.3	0.3	1.4	2.1	2.3	2.3	2.1
% T.O.I. [%]	63.3%	61.6%	60.2%	74.8%	74.8%	74.1%	73.7%	73.6%	73.6%	73.7%
% T.S. [%]	21.1%	20.5%	20.1%	24.9%	24.9%	24.7%	24.6%	24.5%	24.5%	24.6%
% C.I. [%]	15.6%	17.9%	19.7%	0.2%	0.2%	1.2%	1.7%	1.9%	1.9%	1.7%

Tabella 7.3.13: Risultati al variare della velocità d'orario - linea tradizionale - Blocco Fisso

Il grafico seguente esemplifica il legame tra la capacità e l'incremento di velocità d'orario delle due tipologie di treni rispetto a quella base.

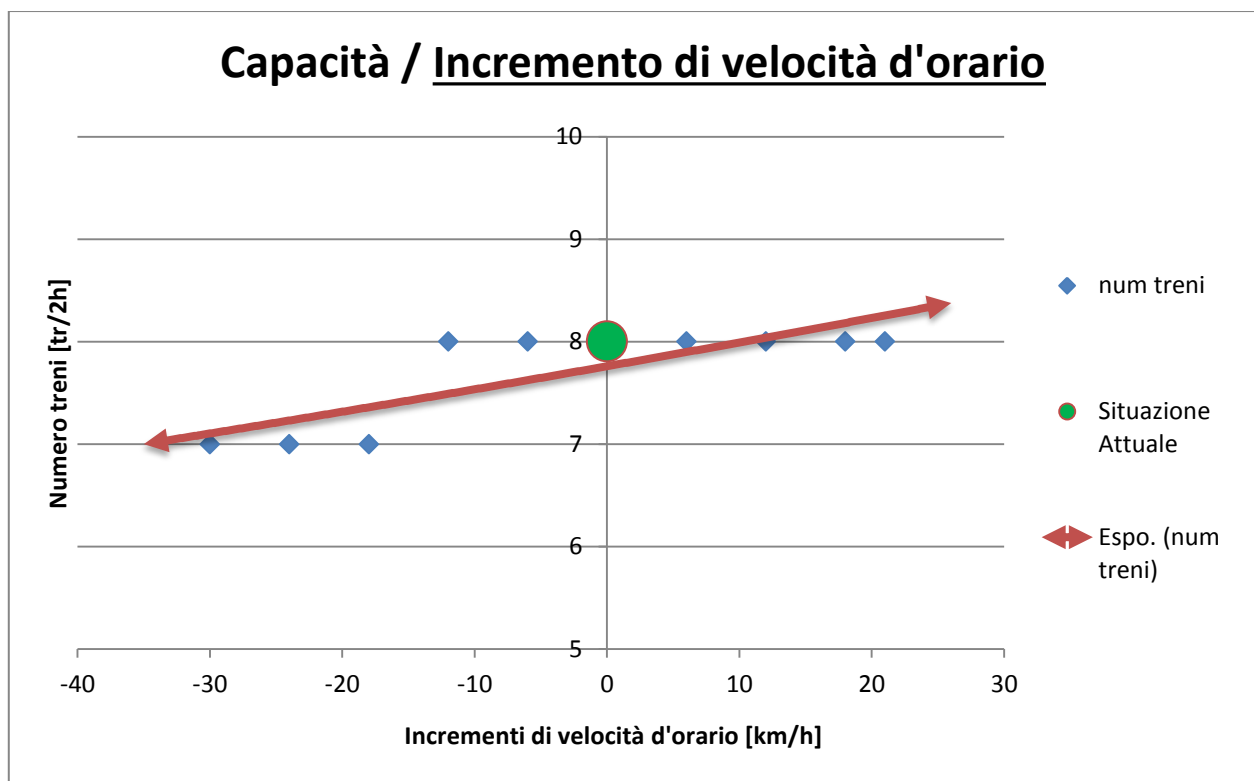


Grafico 7.3.7: Legame tra velocità d'orario e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

La capacità cresce all'aumentare della velocità, ma non per velocità maggiori di quelle del caso di base. A differenza di quanto visto con l'alta velocità, quando al treno Suburbano si assegna una velocità inferiore al secondo limite di velocità (110 km/h), non si ha un puntuale incremento del numero di treni. Infatti accade che è certamente possibile tenere una sezione in meno di distanziamento per il Suburbano, quando viaggia a regime, ma questo vantaggio non viene sfruttato poiché le sezioni critiche per la capacità sono quelle iniziali e finali (vedere paragrafo 7.3.1.1), ovvero quelle in cui avvengono accelerazione e decelerazione.

7.3.1.9 Limiti di velocità

La tabella seguente riporta i risultati ottenuti con dei diversi limiti velocità, compatibili con sezioni di blocco di 1'350 m.

Limite di velocità 1 [km/h]	<u>30</u>	<u>50</u>	<u>50</u>	<u>50</u>	<u>60</u>	<u>60</u>
Limite di velocità 2 [km/h]	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>110</u>	<u>120</u>	<u>140</u>	<u>150</u>
Limite di velocità 3 [km/h]	<u>180</u>	<u>180</u>	<u>180</u>	<u>180</u>	<u>180</u>	<u>180</u>
T/20	7	8	8	8	8	8
T.O.I. [min]	71.9	89.0	89.0	89.0	88.0	88.0
T.S. [min]	24.0	29.7	29.7	29.7	29.3	29.3
C.I. [min]	24.2	1.4	1.4	1.4	2.7	2.7
% T.O.I. [%]	59.9%	74.1%	74.1%	74.1%	73.3%	73.3%
% T.S. [%]	20.0%	24.7%	24.7%	24.7%	24.4%	24.4%
% C.I. [%]	20.2%	1.1%	1.2%	1.2%	2.3%	2.3%

Tabella 7.3.14: Risultati al variare dei limiti di velocità - linea tradizionale - Blocco Fisso

Il grafico seguente esemplifica il legame tra capacità e limiti di velocità (in ascissa ci si riferisce alla variazione percentuale media dei tre limiti di velocità).

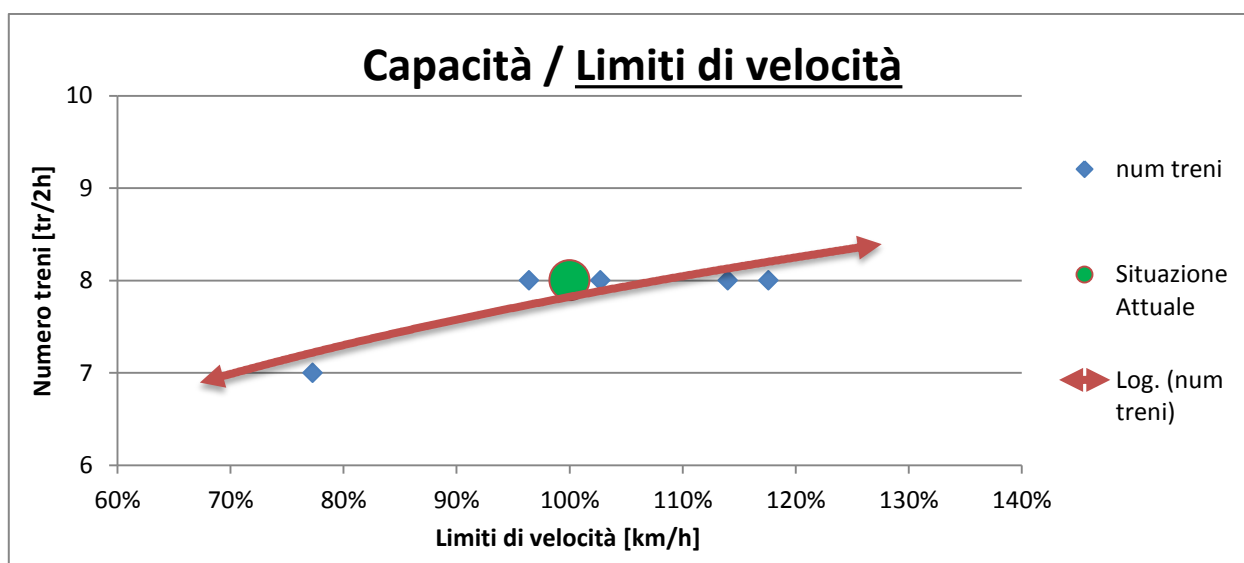


Grafico 7.3.8: Legame tra limiti di velocità e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

La capacità cresce all'aumentare dei limiti di velocità. L'adozione di più elevati limiti di velocità a parità di sezioni libere consente una maggiore compattazione delle tracce. Si riducono però i franchi di sicurezza. L'aumento di detti limiti però non fornisce un grande contributo su linee eterotachiche, questo sempre per il motivo che le sezioni critiche non sono quelle in cui il treno

procede a regime ma quelle in cui si svolge l'accelerazione o la decelerazione. Quindi il limite che incide di più è il primo (nel caso base 50 km/h), che però non è stato fatto variare in quanto si è ritenuto imprudente consentire velocità più elevate quando vi è un'unica sezione libera.

7.3.1.10 Differenza tra le velocità dei due treni

All'inizio del paragrafo 1.1.1, è stato spiegato l'impatto che l'eterotachia ha sulla capacità. Si vuole ora approfondire il concetto osservando i risultati ottenuti al diminuire o all'aumentare della differenza tra le velocità d'orario dei due treni.

Velocità d'orario del Suburbano [km/h]	141	138	132	126	120	114	108	102	99
Velocità d'orario dell'Eurocity [km/h]	141	141	147	153	160	165	171	177	180
ΔV [km/h]	<u>0</u>	<u>3</u>	<u>15</u>	<u>27</u>	40	<u>51</u>	<u>63</u>	<u>75</u>	<u>81</u>
T/20	9	9	9	9	8	7	7	7	7
T.O.I. [min]	80.8	81.4	85.1	89.1	89.0	74.5	77.1	81.3	83.6
T.S. [min]	26.9	27.1	28.4	29.7	29.7	24.8	25.7	27.1	27.9
C.I. [min]	12.2	11.5	6.5	1.2	1.4	20.7	17.3	11.6	8.5
% T.O.I. [%]	67.4%	67.8%	70.9%	74.2%	74.1%	62.1%	64.2%	67.7%	69.7%
% T.S. [%]	22.5%	22.6%	23.6%	24.7%	24.7%	20.7%	21.4%	22.6%	23.2%
% C.I. [%]	10.2%	9.6%	5.4%	1.0%	1.2%	17.2%	14.4%	9.7%	7.1%

Tabella 7.3.15: Risultati al variare della differenza tra le velocità dei due treni - linea tradizionale - Blocco Fisso

Il grafico seguente esemplifica il legame tra capacità e differenza di velocità tra i due treni.

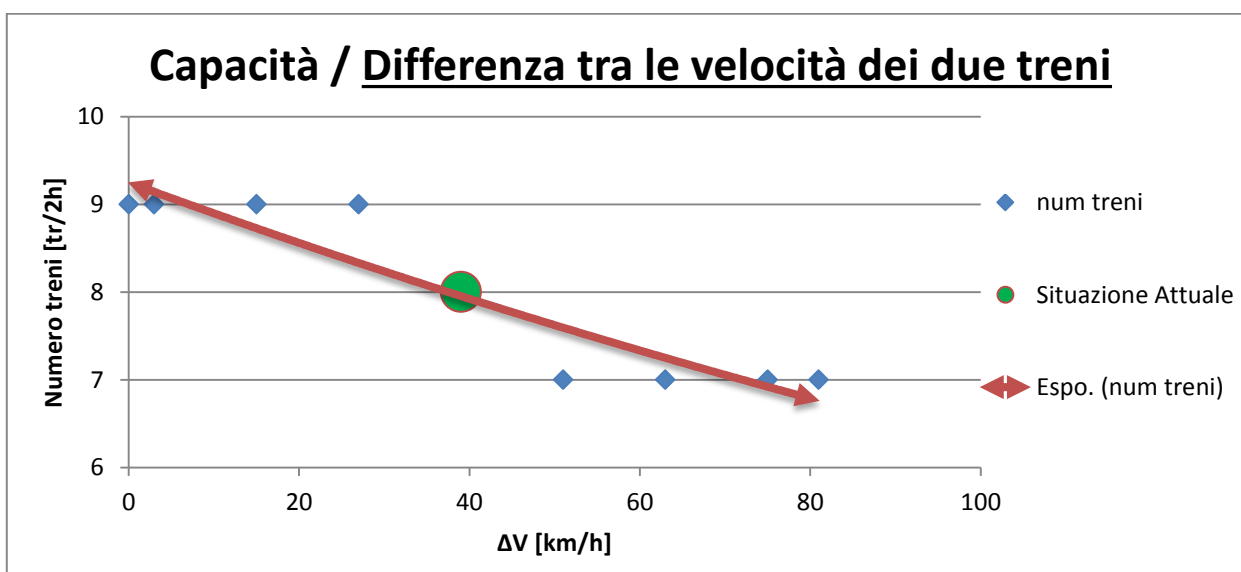


Grafico 7.3.9: Legame tra differenza tra le velocità dei due treni e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

Il numero di treni previsti è inversamente proporzionale alla differenza di velocità tra i due treni. L'impossibilità di effettuare la manovra di precedenza provoca una non ottimale occupazione di infrastruttura, in cui le tracce dei due treni nel diagramma spazio-tempo, sono prossime soltanto in partenza o all'arrivo. Le zone di forma triangolari non occupate e non utilizzabili tra una traccia e l'altra (vedere Figura 7.3.2) aumentano di dimensione al crescere della differenza di velocità tra i due treni. Il caso ideale si ha per treni che abbiano la stessa velocità di servizio, ciononostante, l'occupazione di infrastruttura non è ancora la più ottimale possibile perché le tracce sono comunque diverse a causa del differente numero di fermate. Infatti, anche se a pari velocità massima, il treno Suburbano ha una traccia più lenta dell'Eurocity per via delle varie decelerazioni, fermate e ripartenze.

7.3.1.11 Distanza tra i posti di precedenza

Dal momento che l'eterotachia condiziona fortemente la capacità della linea, un parametro che può essere considerato nello studio è la distanza tra due posti di precedenza. I due estremi della linea del caso base possono indifferentemente essere visti come stazioni di testa, bivi o posti di precedenza; infatti il metodo di calcolo UIC 406 prevede di analizzare la capacità su un tratto di linea in cui non possono avvenire sorpassi o precedenze. Si può affermare che la capacità di una linea è data dalla minima capacità dei tratti che la compongono. Per una linea eterotachica, a parità di tutte le altre caratteristiche, il tratto con minima capacità è quello caratterizzato dalla massima distanza tra due successivi posti di precedenza. Nella situazione di base si è considerata una distanza di 43,2 km tra i due posti di precedenza. Si è reso quindi necessario studiare altri casi per osservare l'effetto che tale distanza ha in termini di capacità.

Distanza tra due posti di precedenza [km]	<u>21.6</u>	<u>27.0</u>	<u>32.4</u>	<u>37.8</u>	43.2	<u>48.6</u>	<u>54.0</u>	<u>59.4</u>	<u>64.8</u>
% rispetto al caso base [%]	50.0 %	62.5 %	75.0 %	87.5 %	100.0 %	112.5 %	125.0 %	137.5 %	150.0 %
Numero di stazioni intermedie [-]	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T/20	15	12	11	9	8	7	7	6	5
T.O.I. [min]	87.7	87.0	89.7	83.0	89.0	78.3	86.6	90.0	69.5
T.S. [min]	29.2	29.0	29.9	27.7	29.7	26.1	28.9	30.0	23.2
C.I. [min]	3.0	4.0	0.4	9.4	1.4	15.6	4.6	0.1	27.4
% T.O.I. [%]	73.1%	72.5%	74.8%	69.1%	74.1%	65.3%	72.1%	75.0%	57.9%
% T.S. [%]	24.4%	24.2%	24.9%	23.0%	24.7%	21.8%	24.0%	25.0%	19.3%

% C.I. [%]	2.5%	3.4%	0.3%	7.8%	1.2%	13.0%	3.8%	0.0%	22.8%
------------	------	------	------	------	------	-------	------	------	-------

Tabella 7.3.16: Risultati al variare della distanza tra due posti di precedenza - linea tradizionale - Blocco Fisso

Il seguente grafico esemplifica quanto riassunto in tabella.

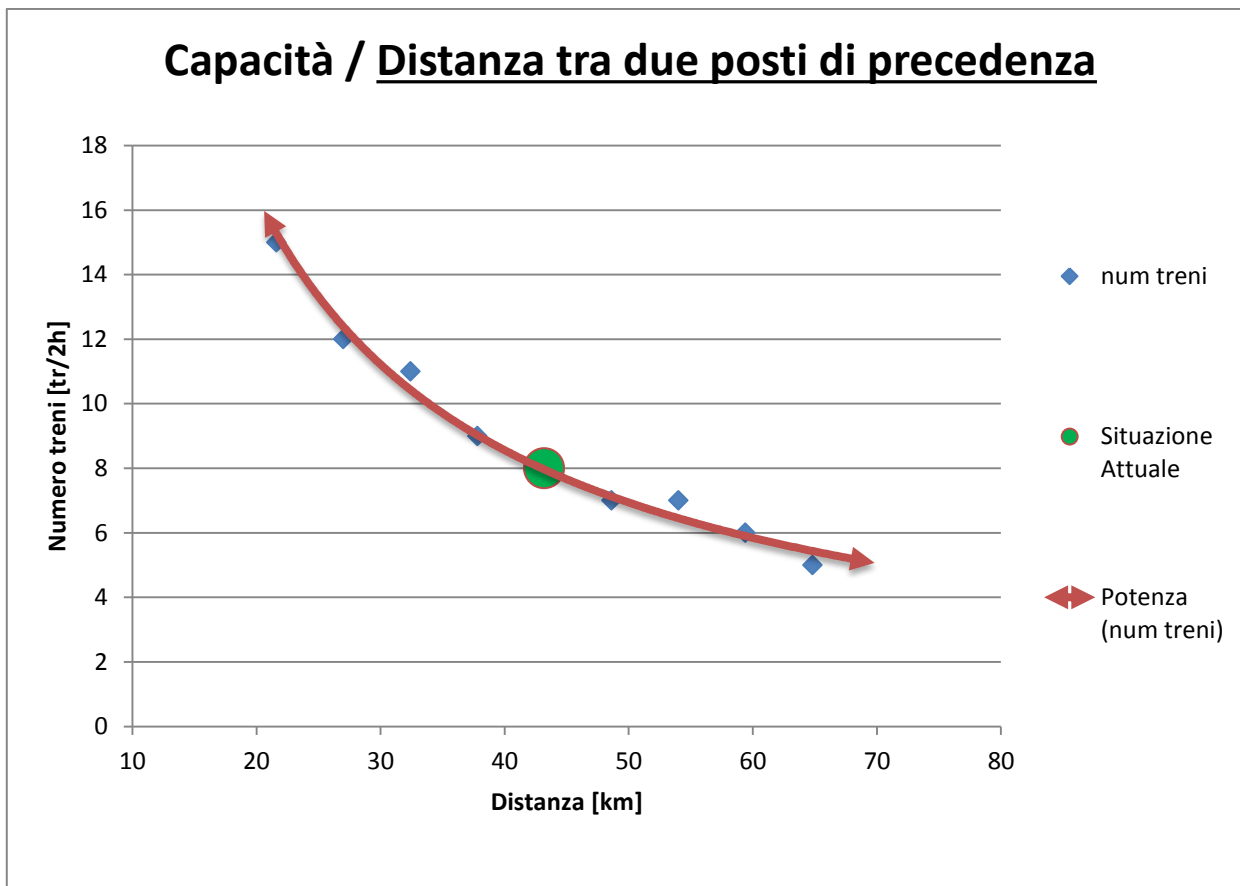


Grafico 7.3.10: Legame tra distanza tra due posti di precedenza e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Fisso

Dall'analisi dei dati ottenuti si vede come al diminuire della distanza tra due punti in cui i treni possono superarsi, ossia, nello specifico, dove l'Eurocity può superare il treno Suburbano, la capacità aumenta notevolmente.

7.3.1.12 Sintesi dei risultati ottenuti

Ricapitolando quanto dedotto nei paragrafi precedenti, si riassumono i risultati ottenuti in un grafico che mostra l'effetto dei vari parametri sulla capacità. Per ottenere un'unica rappresentazione si sono considerate le variazioni dei vari parametri in percentuale rispetto alla situazione di base.

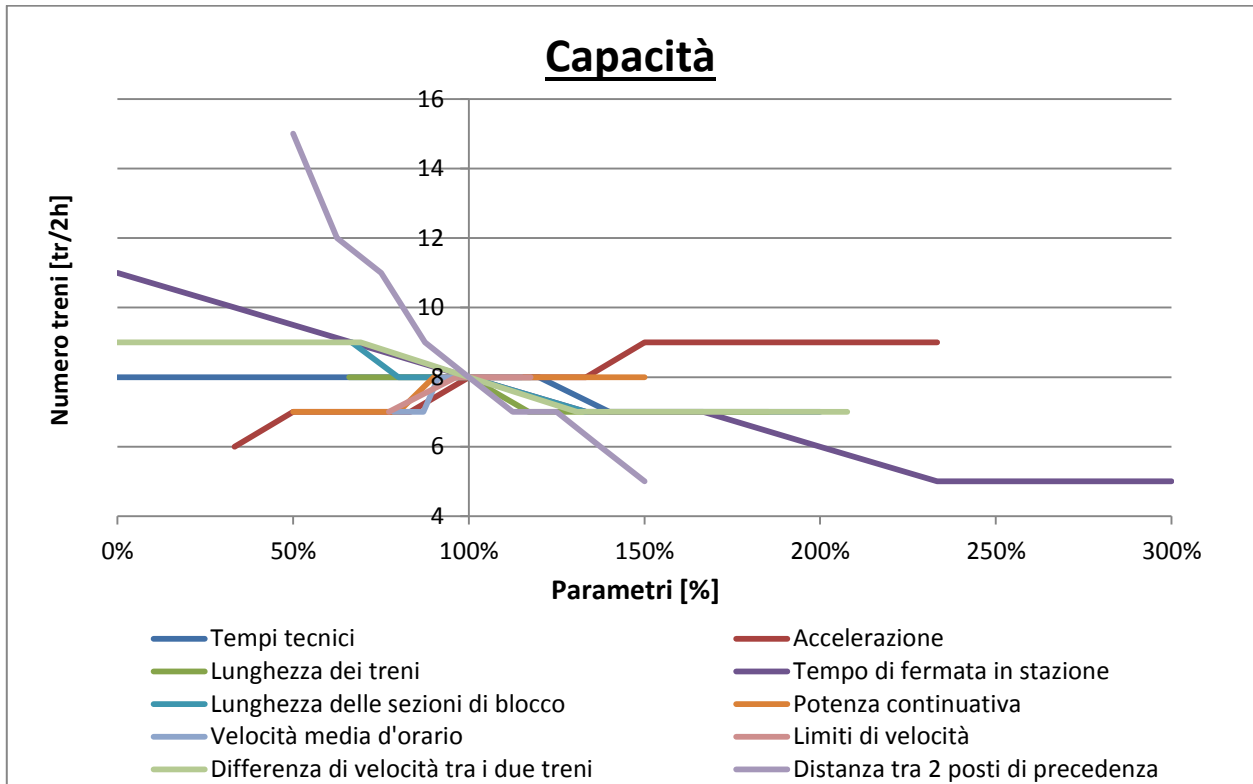


Grafico 7.3.11: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea tradizionale – Blocco Fisso

Se ne rappresenta anche uno zoom centrato sulla situazione attuale.

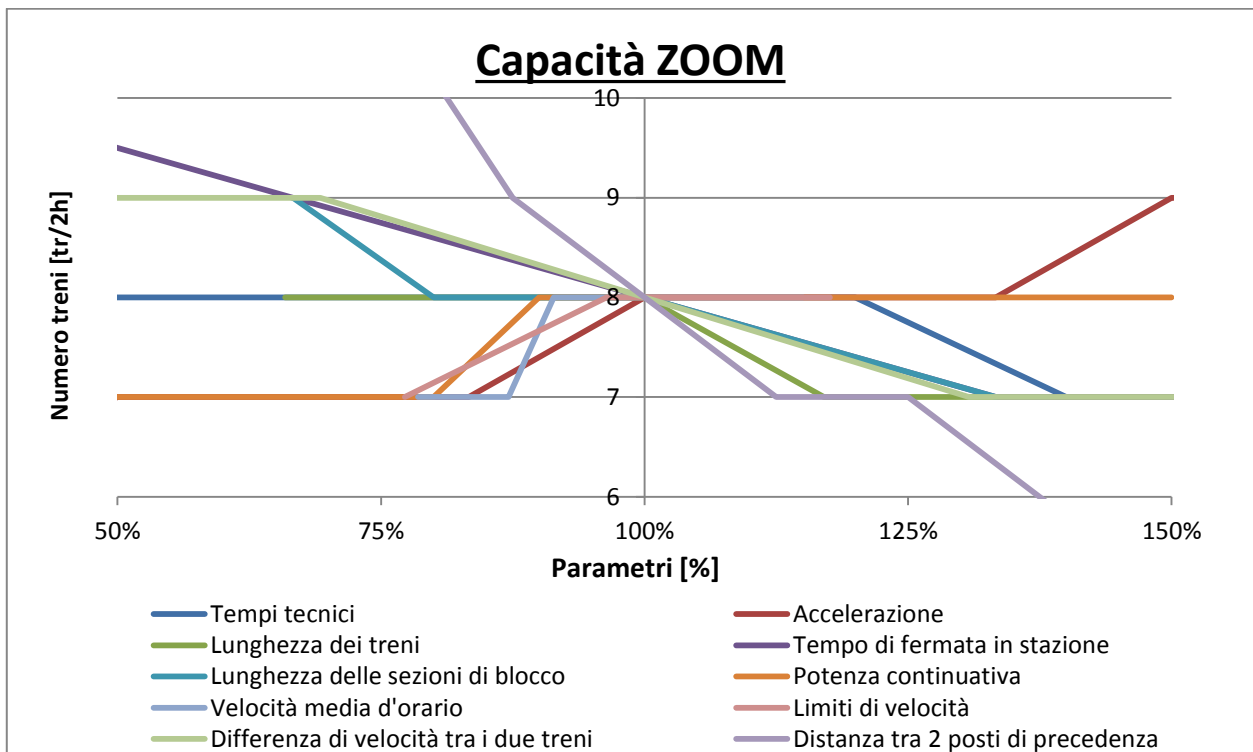


Grafico 7.3.12: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati (ZOOM) – linea tradizionale – Blocco Fisso

Dai grafici precedenti si evince che i parametri la cui variazione percentuale ha maggiore influenza sulla capacità (all'interno del range di variazione considerato in questo lavoro) sono: la distanza tra due posti di precedenza, il tempo di fermata in stazione e l'accelerazione.

L'accelerazione influisce maggiormente rispetto alla velocità d'orario sulla capacità della linea. Infatti, considerando alti valori del parametro accelerazione, la traccia del treno Suburbano tende a velocizzarsi mentre quella dell'Eurocity rimane in sostanza invariata in quanto caratterizzata da una sola fase di accelerazione. Questo comporta una diminuzione del livello di eterotachia e quindi una maggior potenzialità della linea. Al contrario, un aumento della velocità d'orario dei due treni comporta una velocizzazione del treno Suburbano, ma anche del treno Eurocity. In tal caso il livello di eterotachicità rimane invariato e con esso la capacità della linea.

Tutti gli altri parametri influenzano comunque in qualche modo la capacità. Si ricorda che il grafico riporta soltanto un confronto tra le percentuali di variazione dei parametri, senza legame diretto con l'attuabilità tecnico/economica di tali variazioni.

In alcuni casi, pur senza variazione di numero di treni prevedibili, la variazione di alcuni parametri può portare a vantaggi in termini di stabilità dell'orario, riducendo il tempo di occupazione dell'infrastruttura. Lo si può osservare nel grafico seguente, dove sono state riportate le percentuali di occupazione dell'infrastruttura riferite al numero di treni originariamente previsti nell'orario.

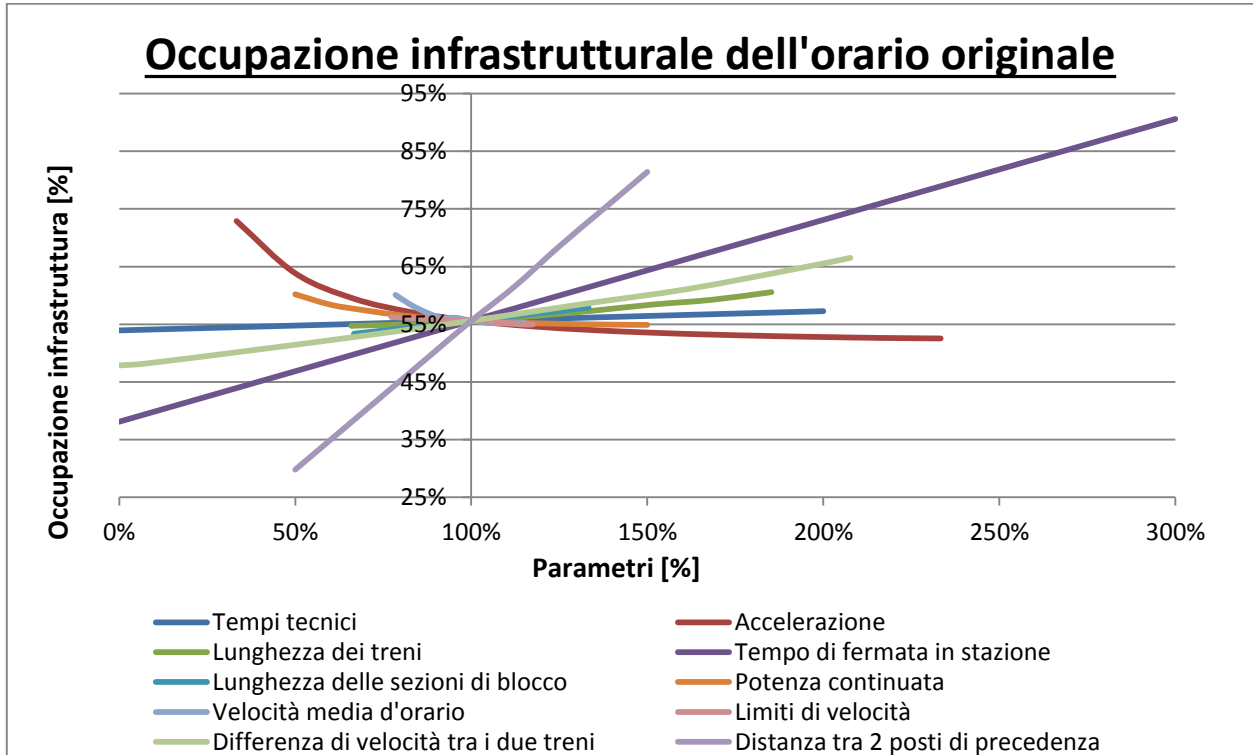


Grafico 7.3.13: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea tradizionale – Blocco Fisso

Se ne rappresenta anche uno zoom centrato sulla situazione attuale.

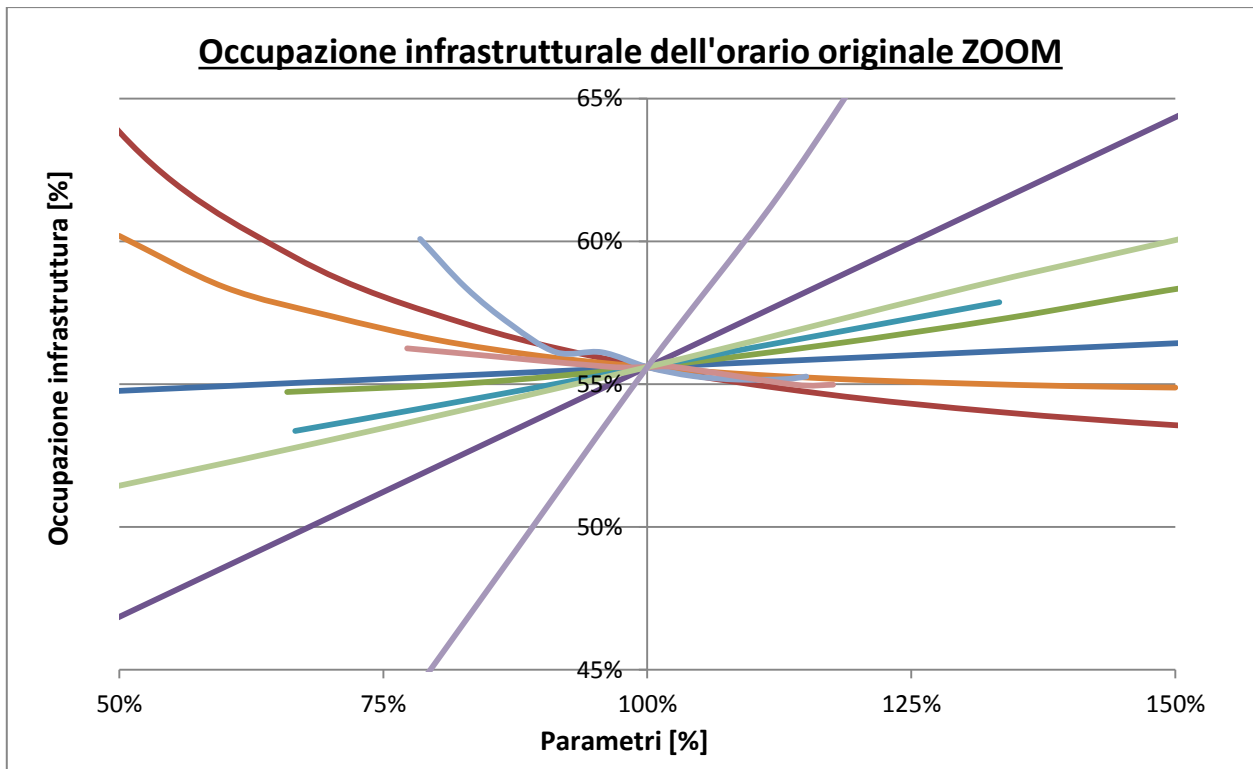


Grafico 7.3.14: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati (ZOOM) – linea tradizionale – Blocco Fisso

Da questo grafico è più semplice riconoscere l'incisività dei singoli parametri, le cui curve sono più ripide. Pertanto si può dedurre che oltre ai parametri sopra menzionati, anche la velocità media d'orario e la differenza di velocità tra i due treni ricoprono un ruolo importante nella definizione di capacità per una linea eterotachica tradizionale.

7.3.2 Blocco Mobile

La linea gestita con un distanziamento a Blocco Mobile non prevede più ovviamente sezioni di blocco. Il distanziamento è dato dai seguenti termini:

- distanza di arresto;
- tempi tecnici + tempo di reazione;
- lunghezza treno;
- franco di sicurezza.

In questo paragrafo sono stati utilizzati i codici di calcolo riferiti agli algoritmi di Figura 6.2.1, Figura 6.4.3 e Figura 6.4.4.

7.3.2.1 Situazione di base

Così come per il caso di distanziamento a Blocco Fisso, è stato necessario definire una situazione base, in modo da riferirsi sempre a questa, variando di volta in volta uno solo dei parametri.

I tempi tecnici sono dati dalle seguenti sotto-voci (dedotte dallo studio commissionato dall'UIC al Verkehrswissenschaftliches Institute di Aquisgrana [17]).

Tempo per il controllo dell'integrità del treno [s]	9
Tempo per la trasmissione dei dati tra treno1 e RBC [s]	3
Tempo di elaborazione del RBC [s]	4
Tempo per la trasmissione dei dati tra RBC e treno2 [s]	3
Tempo di elaborazione del computer di bordo [s]	3
Tempo di reazione del macchinista [s]	3
<i>Tempo totale [s]</i>	25
Franco di sicurezza [m]	800

Tabella 7.3.17: Tempi di blocco e Franco di sicurezza – linea tradizionale – Blocco Mobile

Si è scelto un franco di sicurezza di 800 m, in modo tale che sia equivalente al franco di sicurezza implicito nel distanziamento a Blocco Fisso con limiti di velocità. Esso era il franco di sicurezza per

un treno viaggiante a 180 km/h (terzo limite di velocità) e con tempo di reazione del macchinista pari a 3 secondi.

Se si applica questo scenario all'orario originale precedentemente presentato (6 treni/2ore), si ottengono i seguenti risultati.

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	62.1
Tempo di sicurezza [min]	20.7
Capacità inutilizzata [min]	37.2
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	51.7%
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	17.2%
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	31.0%
Treni nella finestra di tempo	6
Velocità media Suburbano [km/h]	72 km/h
Velocità media Eurocity [km/h]	148 km/h
Consumo di capacità [%]	68.9 %
Stabilità	48.2 %
Eterogeneità	50 %

Tabella 7.3.18: Risultati della compressione dell'orario originale – linea tradizionale – Blocco Mobile

Come in precedenza, si nota che anche con il distanziamento a Blocco Mobile possono essere inseriti nell'orario ulteriori treni fino al raggiungimento del limite di occupazione consigliato dall'UIC. Si sono ottenuti i seguenti valori:

Tempo di occupazione dell'infrastruttura [min]	86.0
Tempo di sicurezza [min]	28.7
Capacità inutilizzata [min]	5.3
Percentuale di occupazione dell'infrastruttura [%]	71.7%
Percentuale di tempo di sicurezza [%]	23.9%
Percentuale di capacità inutilizzata [%]	4.5%
Treni nella finestra di tempo	9
Velocità media Suburbano [km/h]	72 km/h
Velocità media Eurocity [km/h]	148 km/h
Consumo di capacità [%]	95.6 %
Stabilità	28.4 %
Eterogeneità	50 %

Tabella 7.3.19: Risultati della compressione dell'orario portato a saturazione – linea tradizionale – Blocco Mobile

Si stima dunque un possibile incremento fino a 9 treni/2ore. Rispetto al distanziamento a Blocco Fisso è possibile l'inserimento di 1 treni/2ore. Questo risultato è motivato dall'utilizzo più razionale che questo tipo di distanziamento fa della linea, valutando l'occupazione in funzione della velocità corrente del treno. Tuttavia ciò non consente vantaggi netti come per le altre tipologie di linee. Il guadagno in termini di occupazione non può essere sfruttato se non nei punti dove le tracce nel diagramma spazio-tempo si avvicinano, ovvero in partenza ed arrivo. A tal proposito risulta esplicativa la Figura 7.3.3, in cui si rappresentano nello stesso grafico spazio-temporale le occupazioni temporali con i due sistemi di distanziamento riferite ad un treno veloce ed uno lento.

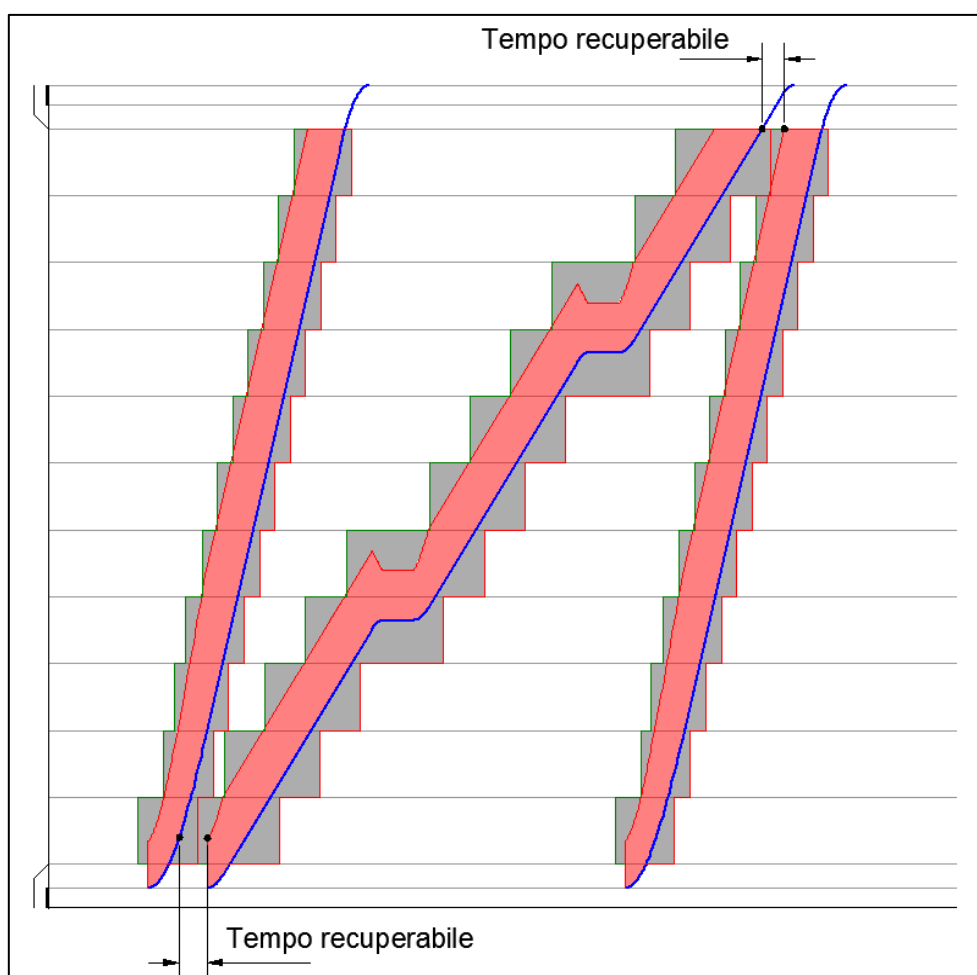


Figura 7.3.3: Tempo recuperabile con l'adozione del Blocco Mobile in una linea tradizionale

L'occupazione "a gradini" tipica del Blocco Fisso, si trasforma in un "canale" di occupazione nel Blocco Mobile [18]. Se il distanziamento a Blocco Fisso è ottimizzato rispetto alla lunghezza delle sezioni di blocco e alla velocità dei treni, alcuni autori (in particolare Wendler [19] e [20])

sostengono che i benefici del distanziamento a Blocco Mobile siano ridotti. In pratica sarebbe possibile escludere dall'occupazione dei treni le zone in grigio scuro, ma ciò, su linee eterotachiche, conduce soltanto a benefici puntuali (all'inizio e alla fine del tratto di linea considerato).

Si riporta l'elenco di parametri che sono stati fatti variare per osservare quali hanno una maggiore o minore influenza sulla capacità intesa come numero massimo di treni/ora prevedibili. Ad essi viene affiancato il loro valore nel caso di base.

Tempi tecnici [s]	20
Accelerazione di servizio [m/s^2]	0.54
Lunghezza del Suburbano [m]	131
Lunghezza dell'Eurocity [m]	175
Tempo di fermata in stazione [s]	60
Potenza del Suburbano [kW]	3'400
Potenza dell'Eurocity [kW]	5'520
Massima velocità d'orario del Suburbano [km/h]	120
Massima velocità d'orario dell'Eurocity [km/h]	160
Franco di sicurezza [m]	800
Differenza tra le velocità dei due treni [km/h]	40
Distanza tra due posti di precedenza [km]	43.2

Tabella 7.3.20: Parametri considerati e loro valore nel caso di base – linea tradizionale – Blocco Mobile

Di seguito si analizzano i risultati di capacità al variare dei parametri considerati.

7.3.2.2 Tempi tecnici

Si analizzano i casi con tempi tecnici che variano da 0 a 50 secondi.

Tempi tecnici [s]	<u>0</u>	<u>5</u>	<u>10</u>	<u>15</u>	<u>20</u>	25	<u>30</u>	<u>35</u>	<u>40</u>	<u>45</u>	<u>50</u>
T/20	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
T.O.I. [min]	84.0	84.3	84.8	85.2	85.6	86.0	86.6	87.2	88.0	88.6	89.2
T.S. [min]	28.0	28.1	28.3	28.4	28.5	28.7	28.9	29.1	29.3	29.5	29.7
C.I. [min]	8.1	7.6	6.9	6.5	5.8	5.3	4.5	3.7	2.7	1.9	1.1
% T.O.I. [%]	70.0%	70.3%	70.7%	71.0%	71.4%	71.7%	72.2%	72.7%	73.3%	73.8%	74.3%
% T.S. [%]	23.3%	23.4%	23.6%	23.7%	23.8%	23.9%	24.1%	24.2%	24.4%	24.6%	24.8%
% C.I. [%]	6.7%	6.3%	5.8%	5.4%	4.8%	4.5%	3.8%	3.1%	2.3%	1.6%	0.9%

Tabella 7.3.21: Risultati al variare dei tempi tecnici - linea tradizionale - Blocco Mobile

All'interno del range di valori in cui sono stati fatti variare i tempi tecnici, non si ha variazione del massimo numero di treni/ora. L'influenza di questo parametro è scarsa ma comunque presente, basta osservare che l'occupazione di infrastruttura non è affatto stazionaria.

7.3.2.3 Accelerazione di servizio

Nello scenario attuale si è considerata un'accelerazione di servizio pari a 0.54 m/s^2 . Questo dato è comunque variabile a seconda delle linee, delle prestazioni del materiale rotabile e delle esigenze di orario, pertanto si è scelto di valutare la capacità nelle situazioni seguenti.

Acc. di servizio [m/s^2]	<u>0.18</u>	<u>0.27</u>	<u>0.36</u>	<u>0.45</u>	0.54	<u>0.63</u>	<u>0.72</u>	<u>0.81</u>	<u>0.9</u>	<u>0.99</u>	<u>1.08</u>	<u>1.17</u>	<u>1.26</u>
T/20	7	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
T.O.I. [min]	88.2	76.6	89.6	88.7	86.0	84.5	83.2	82.5	82.0	81.6	81.3	81.0	80.9
T.S. [min]	29.4	25.5	29.9	29.6	28.7	28.2	27.7	27.5	27.3	27.2	27.1	27.0	27.0
C.I. [min]	2.4	17.9	0.5	1.7	5.3	7.4	9.0	9.9	10.7	11.2	11.6	12.0	12.2
% T.O.I. [%]	73.5%	63.8%	74.7%	74.0%	71.7%	70.4%	69.4%	68.8%	68.3%	68.0%	67.7%	67.5%	67.4%
% T.S. [%]	24.5%	21.3%	24.9%	24.7%	23.9%	23.5%	23.1%	22.9%	22.8%	22.7%	22.6%	22.5%	22.5%
% C.I. [%]	2.0%	14.9%	0.4%	1.4%	4.5%	6.1%	7.5%	8.3%	8.9%	9.4%	9.7%	10.0%	10.1%

Tabella 7.3.22: Risultati al variare dell'accelerazione di servizio - linea tradizionale - Blocco Mobile

Di seguito si può osservare il legame tra accelerazione e capacità, intesa come numero di treni circolanti.

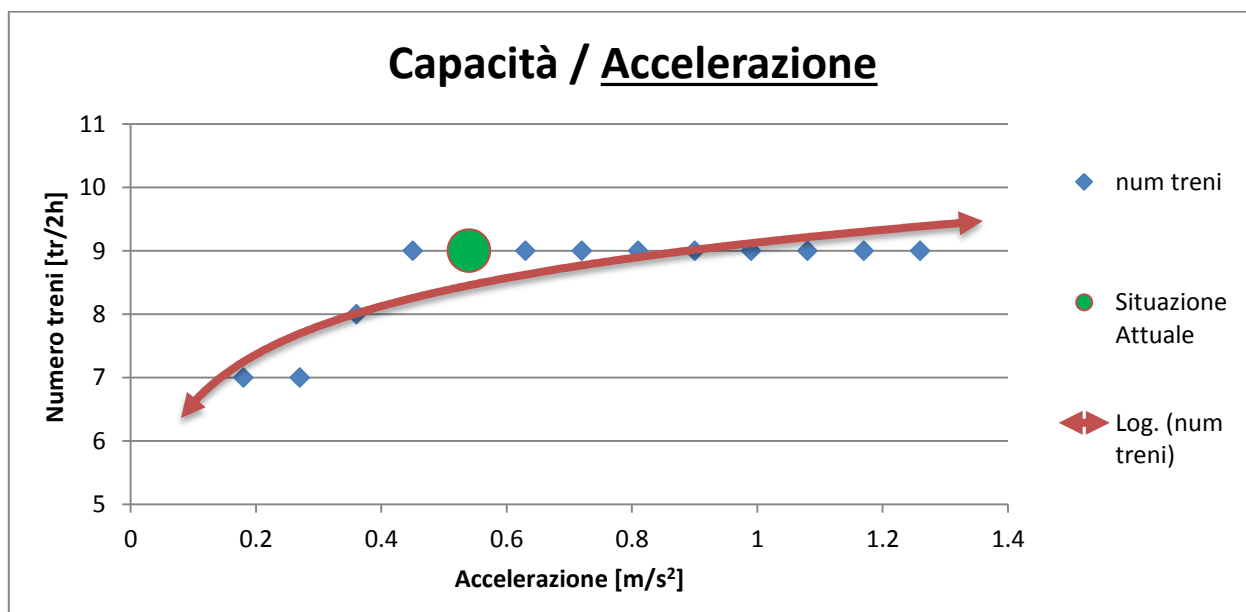


Figura 7.3.4: Legame tra accelerazione di servizio e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile

La capacità risulta crescente con l'accelerazione di servizio, tuttavia il legame non è lineare. L'aumento del valore di accelerazione a partire da quello attuale non porta ad incrementare il massimo numero di treni, invece la sua diminuzione porta ad un decadimento della capacità.

7.3.2.4 Lunghezza del treno

Come nei casi precedenti, nelle linee reali possono circolare treni con diverse composizioni e lunghezze, pertanto si considerano ulteriori possibilità. Dato che sono state previste banchine lunghe 400 metri, questo costituisce un limite massimo per la lunghezza dei treni. La lunghezza dei due treni è stata fatta variare in modo proporzionale dal 50% fino al 150% rispetto alla loro lunghezza originale.

Incremento del numero di carrozze	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Lunghezza del Suburbano [m]	<u>78.9</u>	<u>105.0</u>	<u>131.0</u>	<u>157.0</u>	<u>183.0</u>	<u>209.0</u>	<u>235.1</u>	<u>261.1</u>
Lunghezza dell'Eurocity [m]	<u>133.9</u>	<u>160.6</u>	<u>187.4</u>	<u>214.2</u>	<u>240.9</u>	<u>267.7</u>	<u>294.5</u>	<u>321.3</u>
Massa in servizio del Suburbano [t]	210	278	346	414	482	550	618	686
Massa in servizio dell'Eurocity [t]	321	386	450	514	579	643	707	771
T/20	9	9	9	9	9	8	8	7
T.O.I. [min]	84.6	85.1	86.0	87.4	89.0	87.4	89.3	72.0
T.S. [min]	28.2	28.4	28.7	29.1	29.7	29.1	29.8	24.0
C.I. [min]	7.2	6.5	5.3	3.5	1.3	3.5	1.0	24.0
% T.O.I. [%]	70.5%	71.0%	71.7%	72.8%	74.2%	72.8%	74.4%	60.0%
% T.S. [%]	23.5%	23.7%	23.9%	24.3%	24.7%	24.3%	24.8%	20.0%
% C.I. [%]	6.0%	5.4%	4.5%	2.9%	1.1%	2.9%	0.8%	20.0%

Tabella 7.3.23: Risultati al variare della lunghezza dei treni - linea tradizionale - Blocco Mobile

Di seguito si riporta il grafico corrispondente.

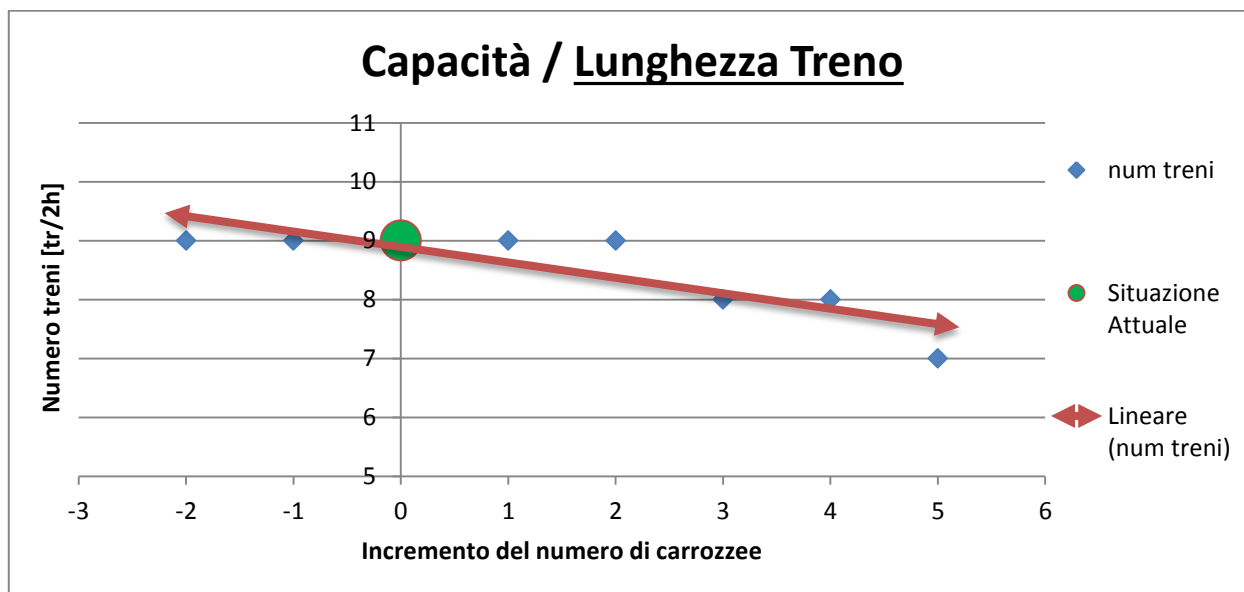


Grafico 7.3.15: Legame tra lunghezza del treno e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile

Questo parametro ha una scarsa incidenza. All'interno del range considerato non si ha una variazione del massimo numero di treni.

Un effetto secondario della diminuzione della lunghezza del treno è la riduzione di peso che, permettendo una minore lunghezza dei tratti di accelerazione, riduce il tempo di percorrenza della tratta.

7.3.2.5 Tempo di fermata

Sono stati considerati vari tempi di fermata in stazione. I più bassi considerati non sono realistici, hanno soltanto una valenza teorica.

Tempo di fermata [s]	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>120</u>	<u>140</u>	<u>160</u>	<u>180</u>
T/20	13	11	9	9	7	7	7	5	5	5
T.O.I. [min]	84.4	82.7	76.3	86.0	72.6	80.0	87.3	64.6	67.0	67.3
T.S. [min]	28.1	27.6	25.4	28.7	24.2	26.7	29.1	21.5	22.3	22.4
C.I. [min]	7.5	9.7	18.2	5.3	23.2	13.4	3.6	33.9	30.7	30.2
% T.O.I. [%]	70.3%	68.9%	63.6%	71.7%	60.5%	66.6%	72.7%	53.8%	55.8%	56.1%
% T.S. [%]	23.4%	23.0%	21.2%	23.9%	20.2%	22.2%	24.2%	17.9%	18.6%	18.7%
% C.I. [%]	6.2%	8.1%	15.2%	4.5%	19.3%	11.2%	3.0%	28.2%	25.6%	25.2%

Tabella 7.3.24: Risultati al variare del tempo di fermata - linea tradizionale - Blocco Mobile

Il grafico presenta l'andamento della capacità.

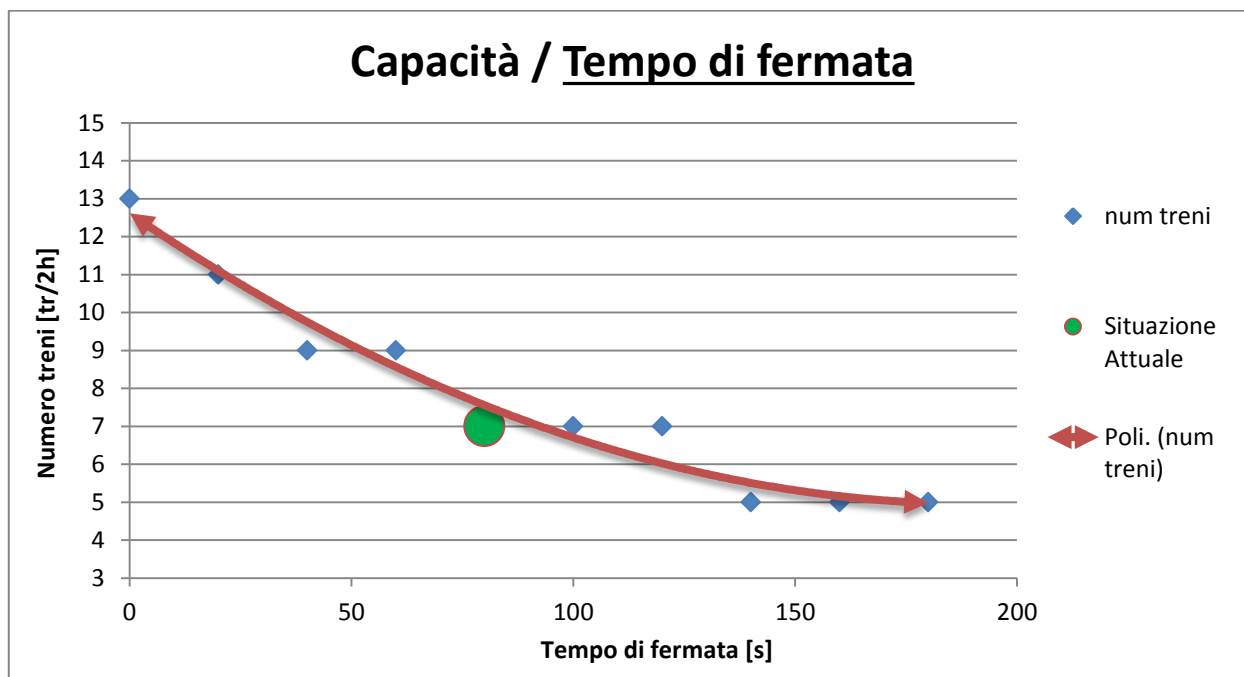


Grafico 7.3.16: Legame tra tempo di fermata e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile

Il tempo di fermata è un parametro di primaria importanza. Questo deriva dal fatto che la linea è omotachica, in particolare ciò che differenzia le due tipologie di treni non è soltanto la loro velocità massima, ma anche il tipo di servizio svolto. Il principio è lo stesso enunciato nell'omologo paragrafo 7.3.1.5.

7.3.2.6 Potenza continuata

Le possibilità offerte sul mercato dei materiali rotabili sono numerose, pertanto si osserva come varia la capacità nel caso di utilizzo di treni con motori di diversa potenza.

Variazione rispetto al caso di base	-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	0%	+10%	+20%	+30%	+40%	+50%
Potenza cont. del Suburbano [kW]	1'700	2'040	2'380	2'720	3'060	3'400	3'740	4'080	4'420	4'760	5'100
Potenza continuata dell'Eurocity [kW]	2'760	3'312	3'864	4'416	4'968	5'520	6'072	6'624	7'176	7'728	8'280
T/20	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9
T.O.I. [min]	71.2	87.4	88.9	87.6	86.8	86.0	85.7	85.4	85.2	85.0	85.0
T.S. [min]	23.7	29.1	29.6	29.2	28.9	28.7	28.6	28.5	28.4	28.3	28.3

C.I. [min]	25.1	3.5	1.5	3.1	4.3	5.3	5.7	6.1	6.5	6.6	6.6
% T.O.I. [%]	59.3%	72.8%	74.1%	73.0%	72.3%	71.7%	71.4%	71.2%	71.0%	70.8%	70.8%
% T.S. [%]	19.8%	24.3%	24.7%	24.3%	24.1%	23.9%	23.8%	23.7%	23.7%	23.6%	23.6%
% C.I. [%]	20.9%	2.9%	1.2%	2.6%	3.5%	4.5%	4.8%	5.1%	5.4%	5.5%	5.5%

Tabella 7.3.25: Risultati al variare della potenza continuata - linea tradizionale - Blocco Mobile

La situazione è piuttosto stazionaria al variare del parametro potenza.

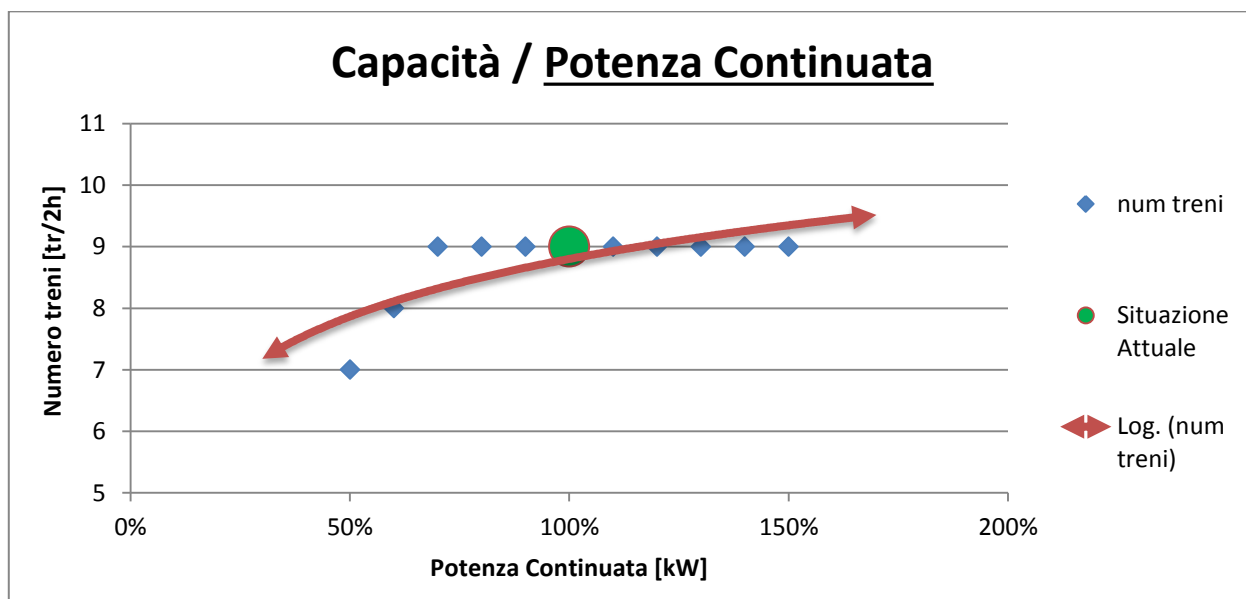


Grafico 7.3.17: Legame tra potenza continuata e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile

All'aumentare della potenza, è possibile sfruttare accelerazioni maggiori e quindi ridurre i tempi di occupazione. Tuttavia l'incremento di potenza, così come nel distanziamento a Blocco Fisso, non porterebbe ad alcun beneficio in termini di aumento di treni/ora mentre una riduzione di potenza del materiale rotabile comporterebbe una perdita di capacità.

7.3.2.7 Velocità d'orario

Di seguito si riportano i risultati al variare delle velocità d'orario considerate. Sono state fatte variare le due velocità delle stesse quantità in modo tale da non modificare la differenza tra di esse e, quindi, mantenere lo stesso grado di eterotachia del traffico.

Velocità d'orario del Suburbano [km/h]	<u>90</u>	<u>96</u>	<u>102</u>	<u>108</u>	<u>114</u>	<u>120</u>	<u>126</u>	<u>132</u>	<u>138</u>	<u>141</u>
Velocità d'orario dell'Eurocity [km/h]	<u>129</u>	<u>135</u>	<u>141</u>	<u>147</u>	<u>153</u>	<u>159</u>	<u>165</u>	<u>171</u>	<u>177</u>	<u>180</u>

Incremento di velocità rispetto a quella base [km/h]	-30	-24	-18	-12	-6	0	6	12	18	21
T/20	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9
T.O.I. [min]	89.0	89.8	88.3	87.1	86.5	86.0	86.0	86.2	86.7	87.0
T.S. [min]	29.7	29.9	29.4	29.0	28.8	28.7	28.7	28.7	28.9	29.0
C.I. [min]	1.3	0.2	2.3	3.9	4.7	5.3	5.3	5.0	4.4	4.0
% T.O.I. [%]	74.2%	74.9%	73.6%	72.6%	72.1%	71.7%	71.7%	71.9%	72.2%	72.5%
% T.S. [%]	24.7%	25.0%	24.5%	24.2%	24.0%	23.9%	23.9%	24.0%	24.1%	24.2%
% C.I. [%]	1.1%	0.2%	1.9%	3.2%	3.9%	4.5%	4.4%	4.2%	3.7%	3.4%

Tabella 7.3.26: Risultati al variare della velocità d'orario - linea tradizionale - Blocco Mobile

Il grafico seguente esemplifica il legame tra la capacità e l'incremento di velocità d'orario delle due tipologie di treni rispetto a quella base.

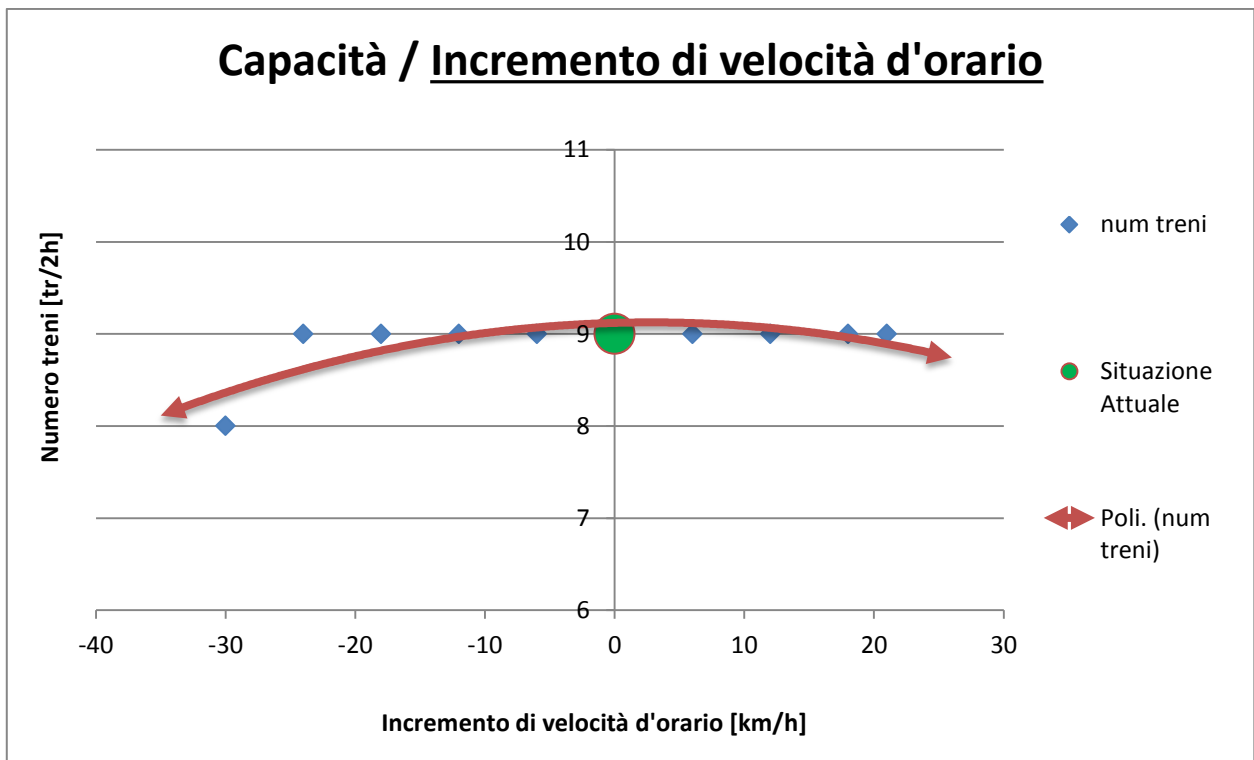


Grafico 7.3.18: Legame tra velocità d'orario e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile

Il massimo numero di treni rimane pressoché stazionario al variare della velocità; soltanto per bassi valori del parametro si ha una riduzione della capacità.

Si può osservare dalla Tabella 7.3.26 che il tempo di occupazione dell'infrastruttura inizialmente diminuisce al crescere della velocità, mentre successivamente aumenta. La spiegazione di questo

fenomeno sta nel fatto che al di sotto di un certo valore della velocità d'orario del Suburbano (intorno ai 115 km/h), un suo aumento consente una velocizzazione delle tracce, e quindi una migliore compattazione; invece, al di sopra di tale velocità, accade che la traccia del treno Suburbano non si velocizza perché la velocità di regime viene tenuta per tempi sempre più brevi. Ne consegue che la traccia del Suburbano rimane circa la stessa all'aumentare della velocità d'orario, mentre quella dell'Eurocity si velocizza in modo visibile, aumentando il grado di eterotachia della linea. Questo porta a zone vuote maggiori nel diagramma spazio-tempo e quindi a una perdita di capacità.

7.3.2.8 Franco di sicurezza

Anche il franco di sicurezza è stato fatto variare, da un valore teorico di zero, fino al doppio rispetto alla situazione base.

Franco di sicurezza [m]	<u>0</u>	<u>200</u>	<u>400</u>	<u>600</u>	800	<u>1000</u>	<u>1200</u>	<u>1400</u>	<u>1600</u>
T/20	9	9	9	9	9	9	9	9	9
T.O.I. [min]	83.0	83.8	84.5	85.2	86.0	86.9	87.7	88.4	89.2
T.S. [min]	27.7	27.9	28.2	28.4	28.7	29.0	29.2	29.5	29.7
C.I. [min]	9.3	8.2	7.4	6.4	5.3	4.1	3.1	2.1	1.1
% T.O.I. [%]	69.2%	69.8%	70.4%	71.0%	71.7%	72.4%	73.0%	73.7%	74.3%
% T.S. [%]	23.1%	23.3%	23.5%	23.7%	23.9%	24.1%	24.3%	24.6%	24.8%
% C.I. [%]	7.7%	6.9%	6.2%	5.3%	4.5%	3.5%	2.6%	1.8%	0.9%

Tabella 7.3.27: Risultati al variare del franco di sicurezza - linea tradizionale - Blocco Mobile

Il franco di sicurezza contribuisce a ridurre o aumentare il tempo di occupazione, ma la sua influenza è ridotta, tanto che il massimo numero di treni circolanti non varia.

7.3.2.9 Differenza tra le velocità dei due treni

In questo paragrafo si approfondisce il legame tra velocità ed eterotachia del traffico.

Velocità d'orario del Suburbano [km/h]	141	138	132	126	120	114	108	102	99
Velocità d'orario dell'Eurocity [km/h]	141	141	147	153	160	165	171	177	180
ΔV [km/h]	<u>0</u>	<u>3</u>	<u>15</u>	<u>27</u>	39	<u>51</u>	<u>63</u>	<u>75</u>	<u>81</u>
T/20	10	10	9	9	9	8	7	7	7
T.O.I. [min]	86.9	87.6	77.4	81.5	86.0	87.7	72.9	77.3	79.5
T.S. [min]	29.0	29.2	25.8	27.2	28.7	29.2	24.3	25.8	26.5

C.I. [min]	4.1	3.2	16.8	11.3	5.3	3.1	22.8	17.0	13.9
% T.O.I. [%]	72.4%	73.0%	64.5%	67.9%	71.7%	73.1%	60.8%	64.4%	66.3%
% T.S. [%]	24.1%	24.3%	21.5%	22.6%	23.9%	24.4%	20.3%	21.5%	22.1%
% C.I. [%]	3.4%	2.6%	14.0%	9.4%	4.5%	2.6%	19.0%	14.2%	11.6%

Tabella 7.3.28: Risultati al variare della differenza tra le velocità dei due treni - linea tradizionale - Blocco Mobile

Il grafico seguente esemplifica il legame tra capacità e differenza di velocità tra i due treni.

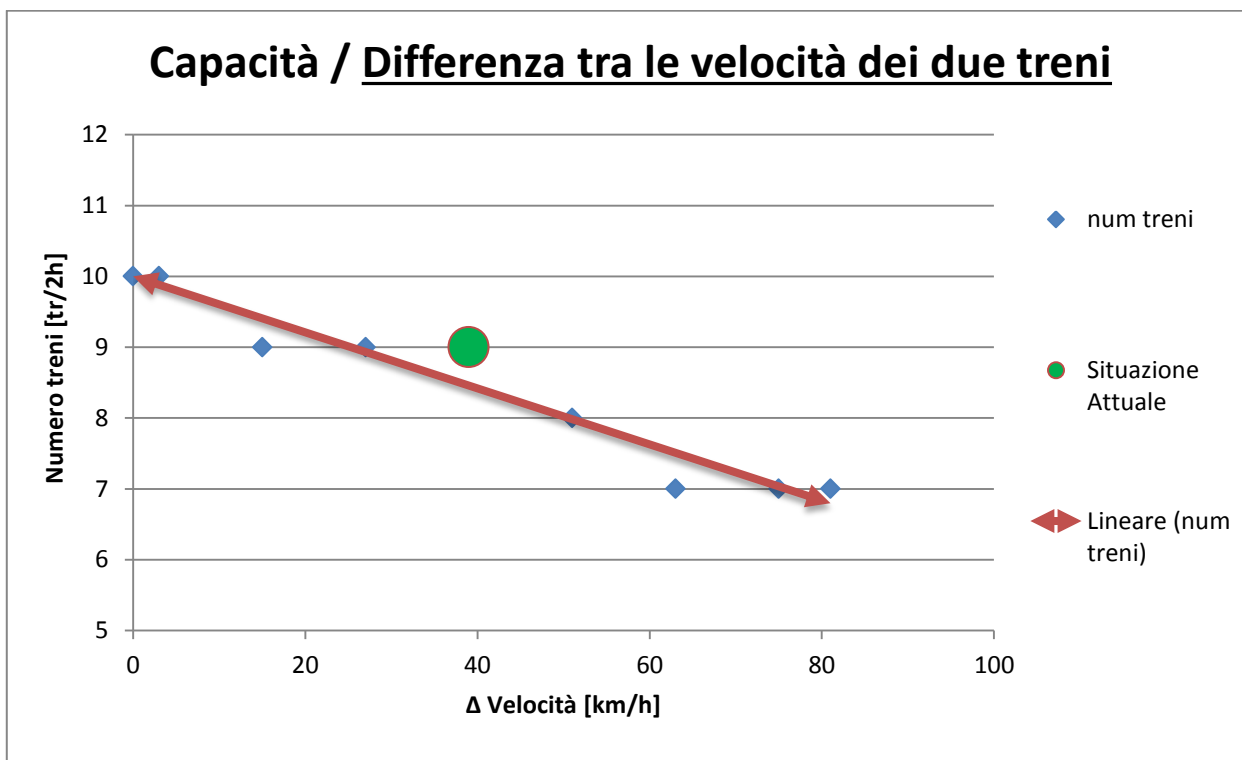


Grafico 7.3.19: Legame tra differenza tra velocità dei due treni e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile

Il numero di treni previsti è inversamente proporzionale alla differenza di velocità tra i due treni. L'impossibilità di effettuare la manovra di precedenza provoca una non ottimale occupazione di infrastruttura, in cui le tracce dei due treni nel diagramma spazio-tempo sono prossime soltanto in partenza o all'arrivo. Il concetto è già stato affrontato nel paragrafo 7.3.1.10.

7.3.2.10 Distanza tra i posti di precedenza

Come precedentemente fatto per il Blocco Fisso, in questo paragrafo si valuta l'influenza che la lunghezza del tratto di linea considerato, ossia la distanza tra due posti in cui è possibile la manovra di precedenza tra i treni, ha sulla capacità della linea.

Distanza tra due posti di precedenza [km]	<u>21.6</u>	<u>27.0</u>	<u>32.4</u>	<u>37.8</u>	43.2	<u>48.6</u>	<u>54.0</u>	<u>59.4</u>	<u>64.8</u>
% rispetto al caso base [%]	50.0 %	62.5 %	75.0 %	87.5 %	100.0 %	112.5 %	125.0 %	137.5 %	150.0 %
Numero di stazioni intermedie [-]	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T/20	17	13	11	9	9	7	7	7	5
T.O.I. [min]	86.4	81.0	81.0	75.7	86.0	73.1	80.8	88.6	65.3
T.S. [min]	28.8	27.0	27.0	25.2	28.7	24.4	26.9	29.5	21.8
C.I. [min]	4.8	12.0	12.0	19.0	5.3	22.5	12.3	1.9	33.0
% T.O.I. [%]	72.0%	67.5%	67.5%	63.1%	71.7%	60.9%	67.3%	73.8%	54.4%
% T.S. [%]	24.0%	22.5%	22.5%	21.0%	23.9%	20.3%	22.4%	24.6%	18.1%
% C.I. [%]	4.0%	10.0%	10.0%	15.9%	4.5%	18.8%	10.2%	1.6%	27.5%

Tabella 7.3.29: Risultati al variare della distanza tra due posti di precedenza - linea tradizionale - Blocco Mobile

Il grafico seguente esplica i risultati della tabella precedente.

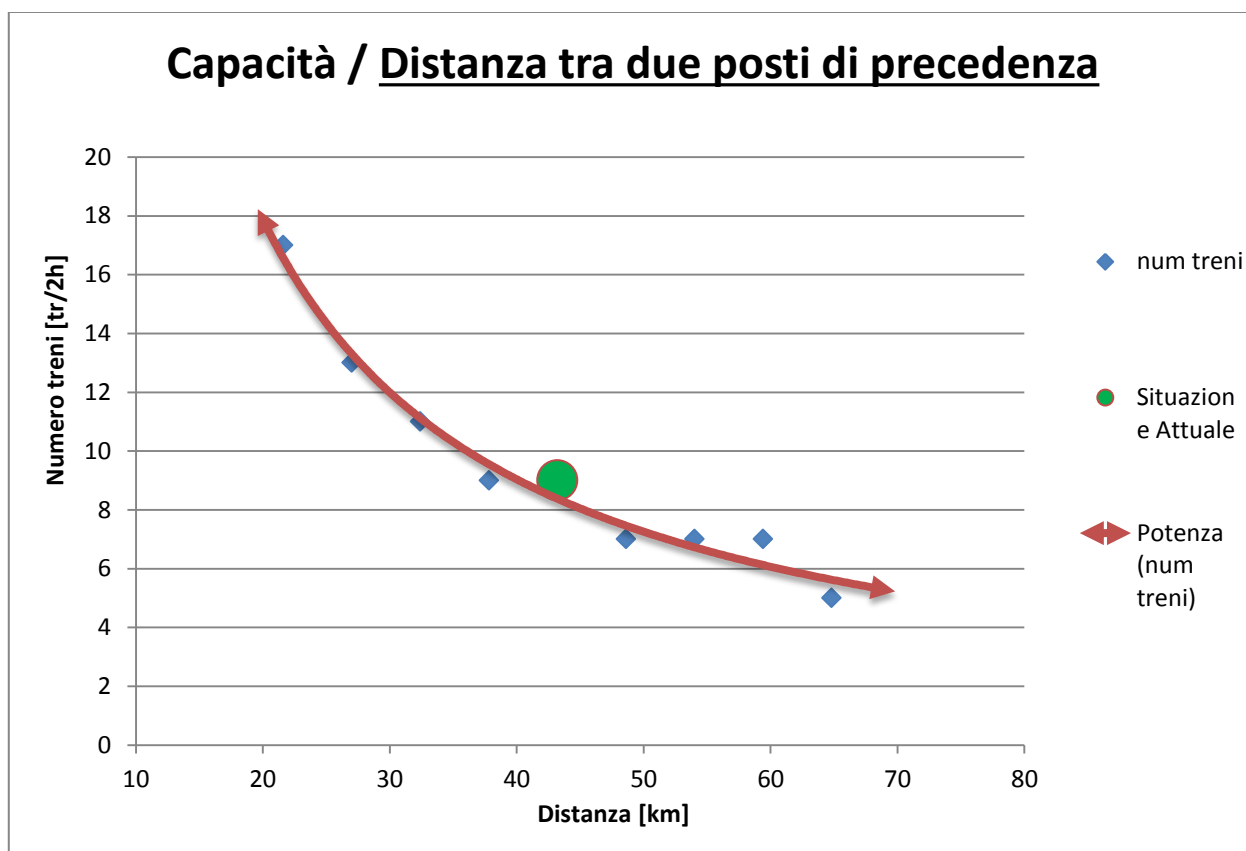


Grafico 7.3.20: Legame distanza tra due posti di precedenza e massimo numero di treni – linea tradizionale – Blocco Mobile

Per il Blocco Mobile è possibile trarre le stesse conclusioni del paragrafo 7.3.1.11, ovvero che al diminuire della distanza tra due punti in cui il treno veloce può sorpassare quello lento, aumenta notevolmente la capacità della linea.

7.3.2.11 Sintesi dei risultati ottenuti

Si riassumono i risultati ottenuti in un grafico che mostra l'effetto dei vari parametri sulla capacità.

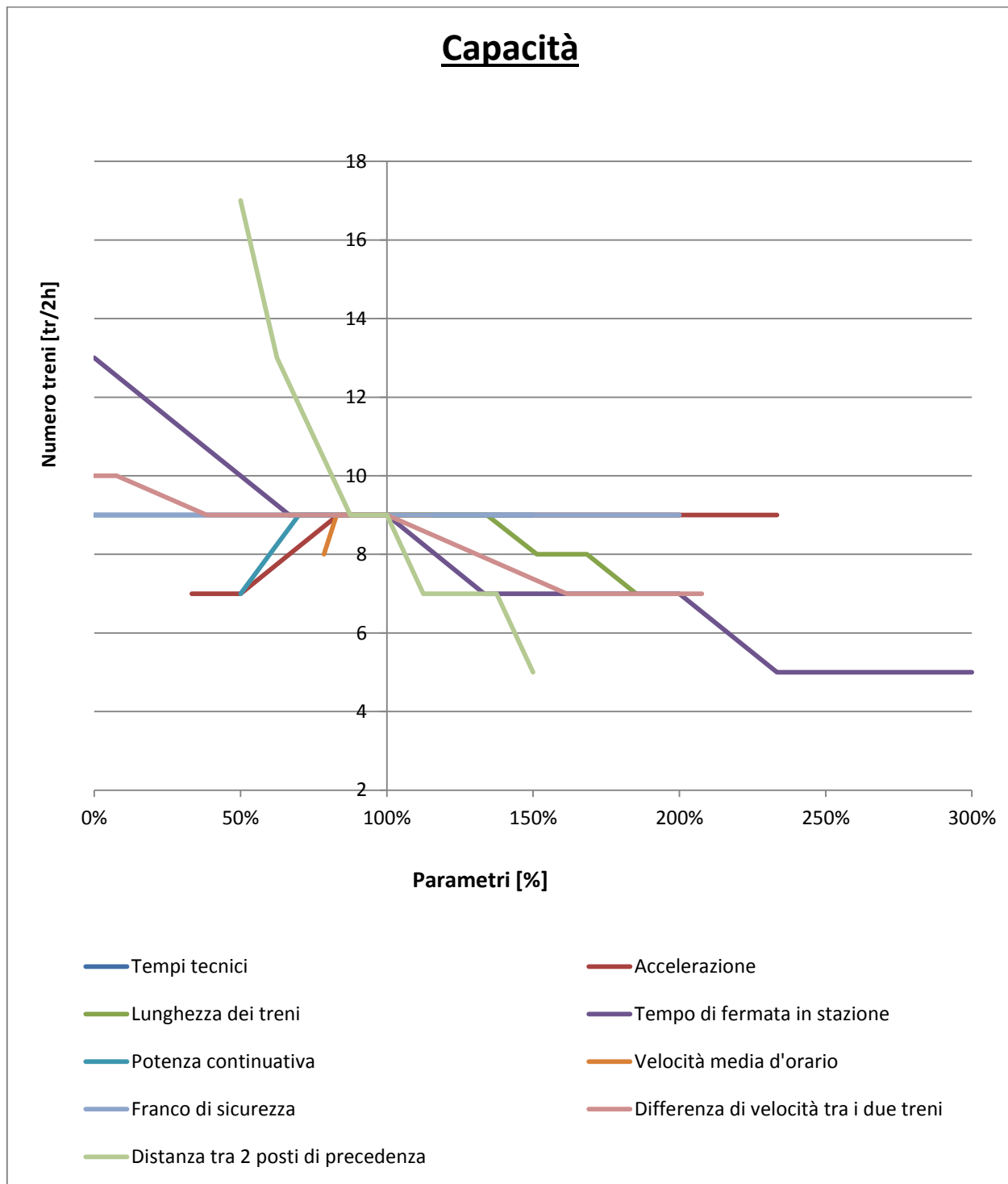


Grafico 7.3.21: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati – linea tradizionale – Blocco Mobile

Se ne rappresenta anche uno zoom centrato sulla situazione attuale.

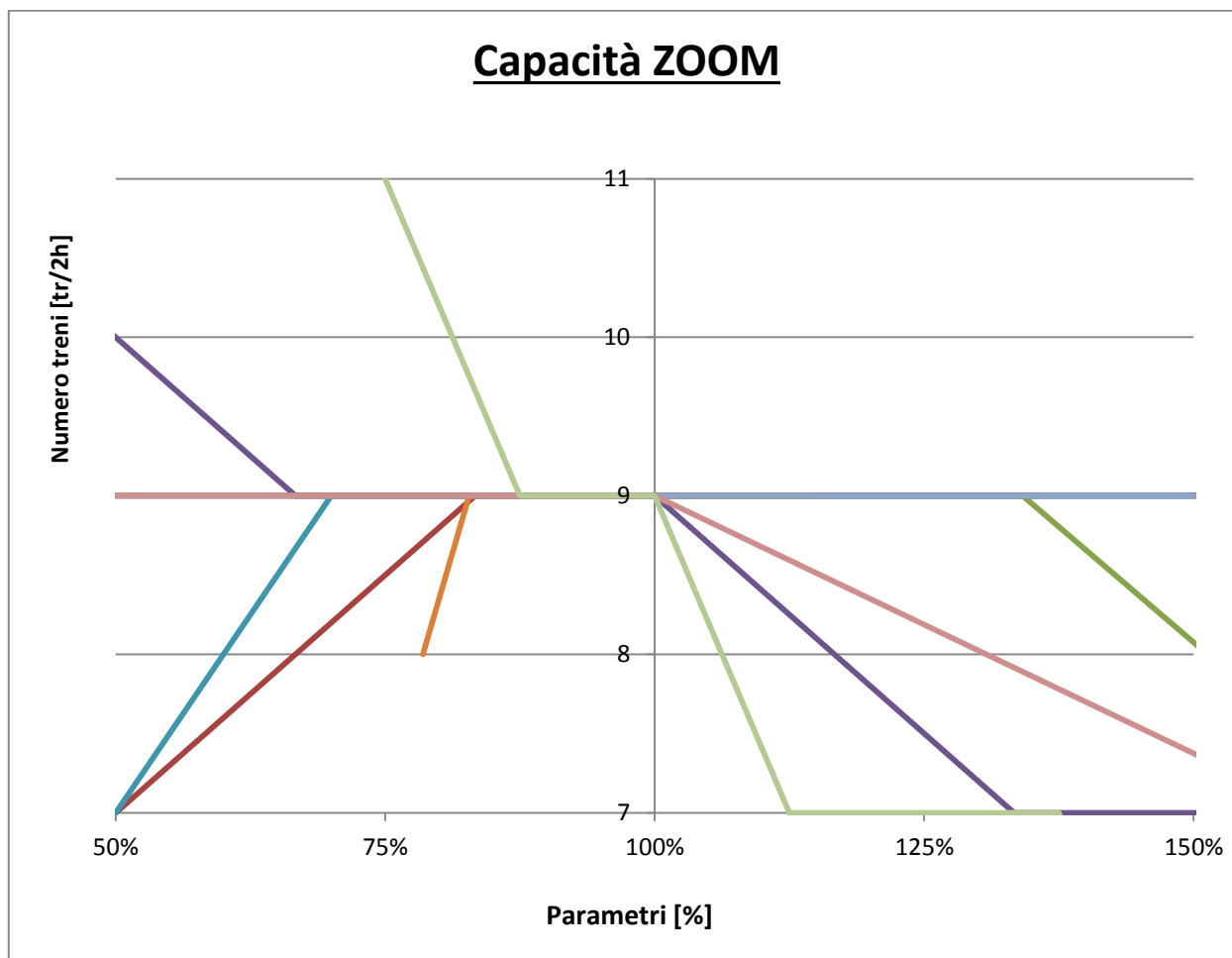


Grafico 7.3.22: Massimo numero di treni al variare dei parametri considerati (ZOOM) – linea tradizionale – Blocco Mobile

Dal grafico si evince che i parametri la cui variazione percentuale ha maggiore influenza sulla capacità (all'interno del range di variazione considerato in questo lavoro) sono: la distanza tra due posti di precedenza, il tempo di fermata in stazione e la differenza di velocità tra i due treni.

Tutti gli altri parametri influenzano comunque in qualche modo la capacità. Si ricorda che il grafico riporta soltanto un confronto tra le percentuali di variazione dei parametri, senza legame diretto con l'attuabilità tecnico/economica di tali variazioni.

In alcuni casi, pur senza variazione di numero di treni prevedibili, la variazione di alcuni parametri può portare a vantaggi in termini di stabilità dell'orario, riducendo il tempo di occupazione dell'infrastruttura. Lo si può osservare nel grafico seguente, dove sono state riportate le percentuali di occupazione dell'infrastruttura riferite al numero di treni originariamente previsti nell'orario.

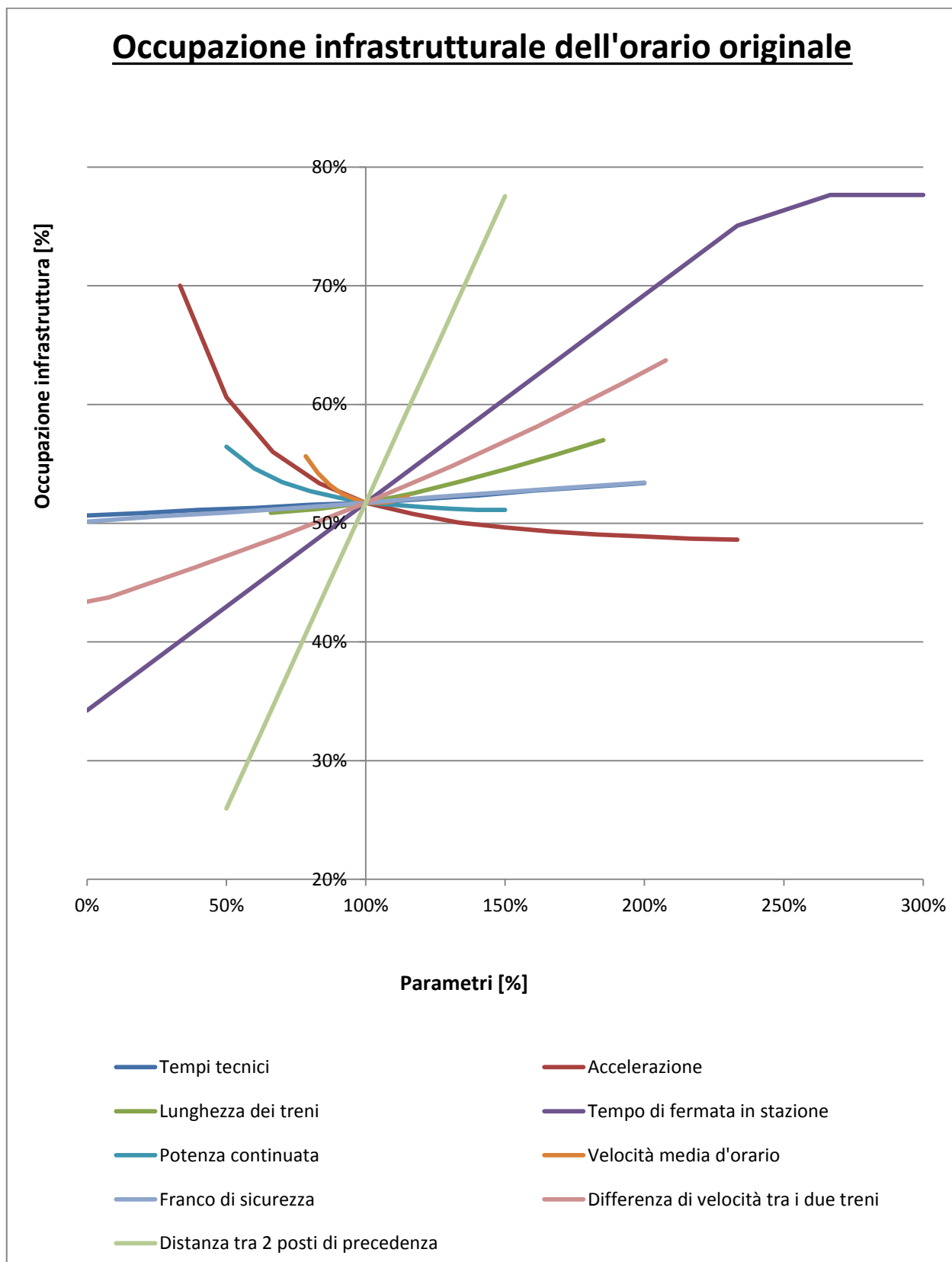


Grafico 7.3.23: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati – linea tradizionale – Blocco Mobile

Se ne rappresenta anche uno zoom centrato sulla situazione attuale.

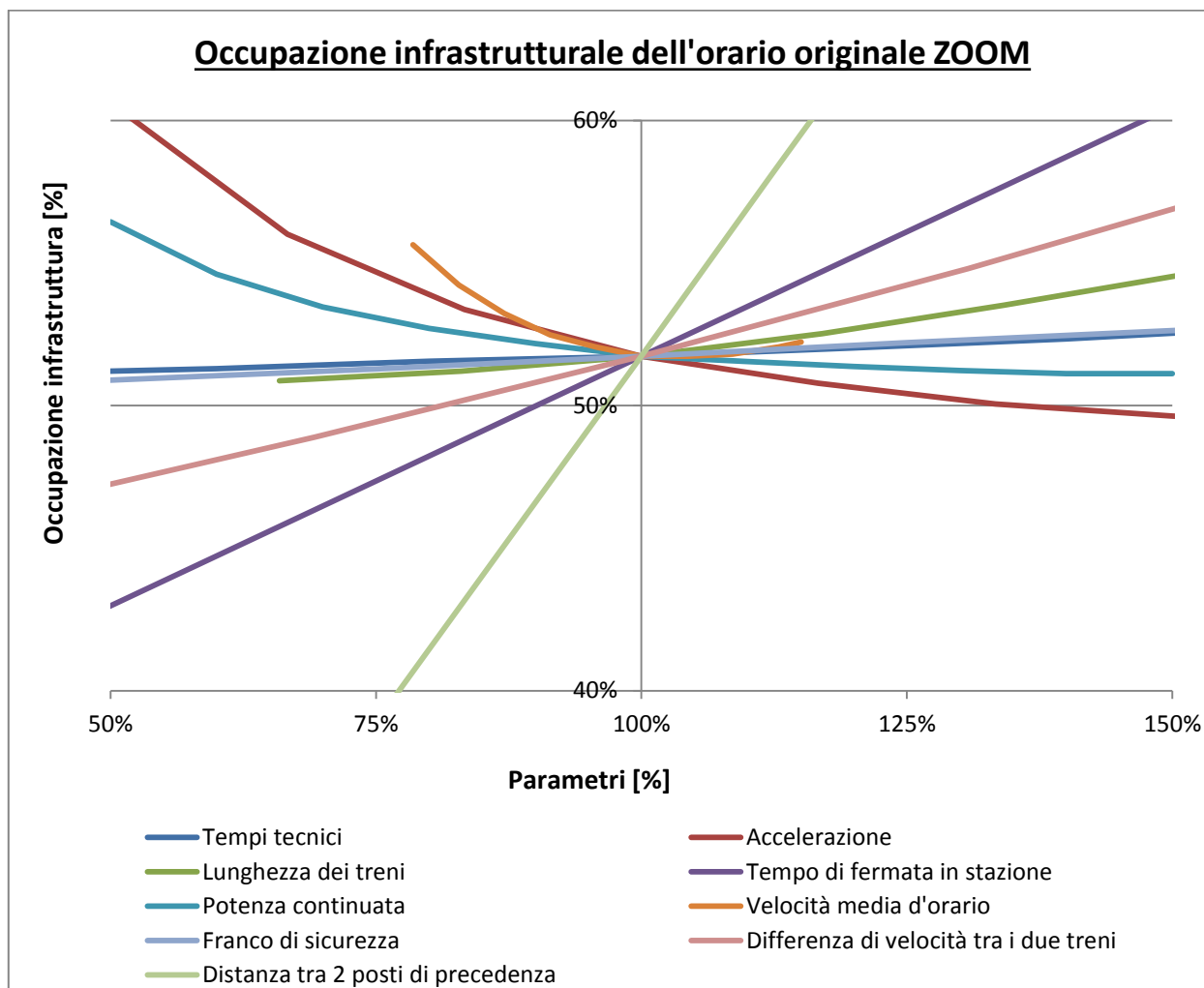


Grafico 7.3.24: Occupazione di infrastruttura al variare dei parametri considerati (ZOOM) – linea tradizionale – Blocco Mobile

Da questo grafico è più semplice riconoscere l'incisività dei singoli parametri, le cui curve sono più ripide. Pertanto si può dedurre che, oltre ai parametri sopra menzionati, anche velocità media d'orario e accelerazione ricoprono un ruolo importante nella definizione di capacità per una linea eterotachica tradizionale.

7.3.3 Confronto

Dall'analisi dei risultati ottenuti si nota come la potenzialità della linea tradizionale cresce con il miglioramento tecnologico del segnalamento e del materiale rotabile e al passare dal distanziamento a Blocco Fisso a quello a Blocco Mobile. Tuttavia la differenza prestazionale di questi due sistemi non è così netta come nelle altre linee finora studiate, infatti si possono notare differenze in termini di massimo numero di treni mai superiori ad 1 treno/ora.

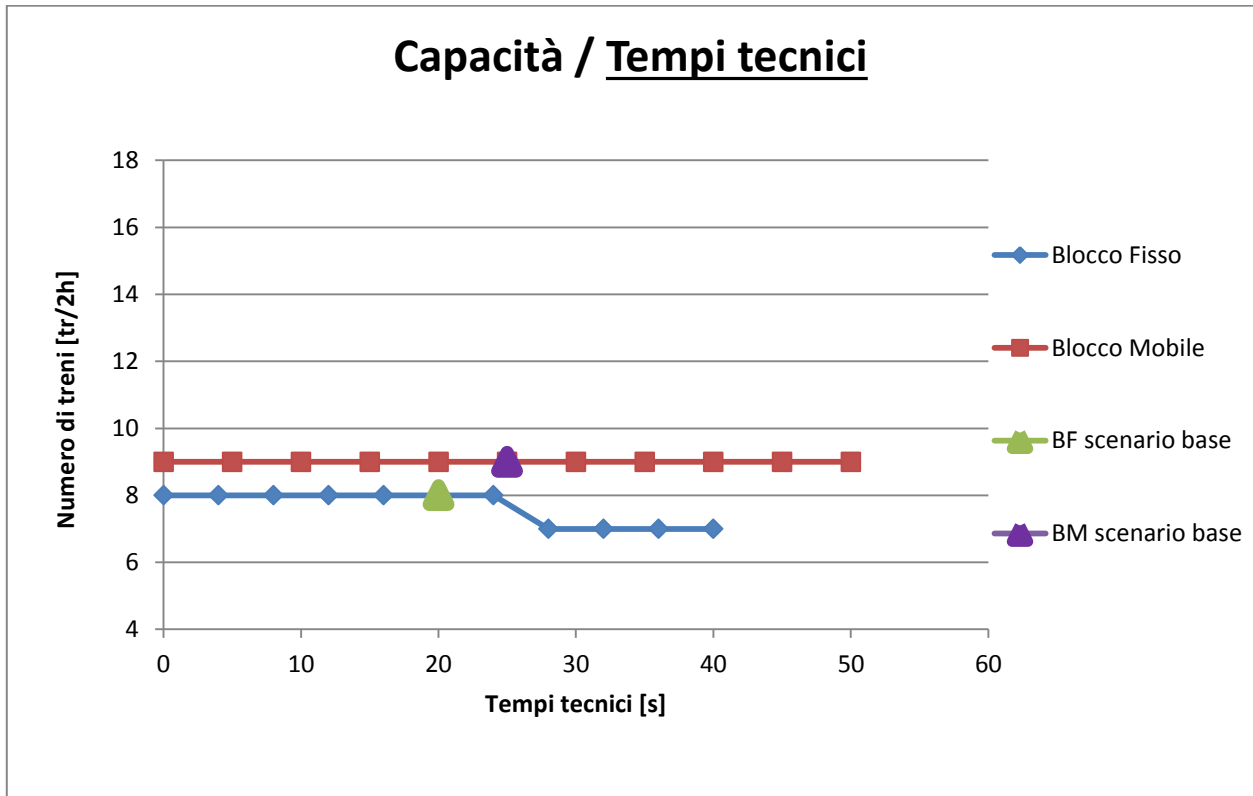


Grafico 7.3.25: Confronto al variare dei tempi tecnici - linea tradizionale

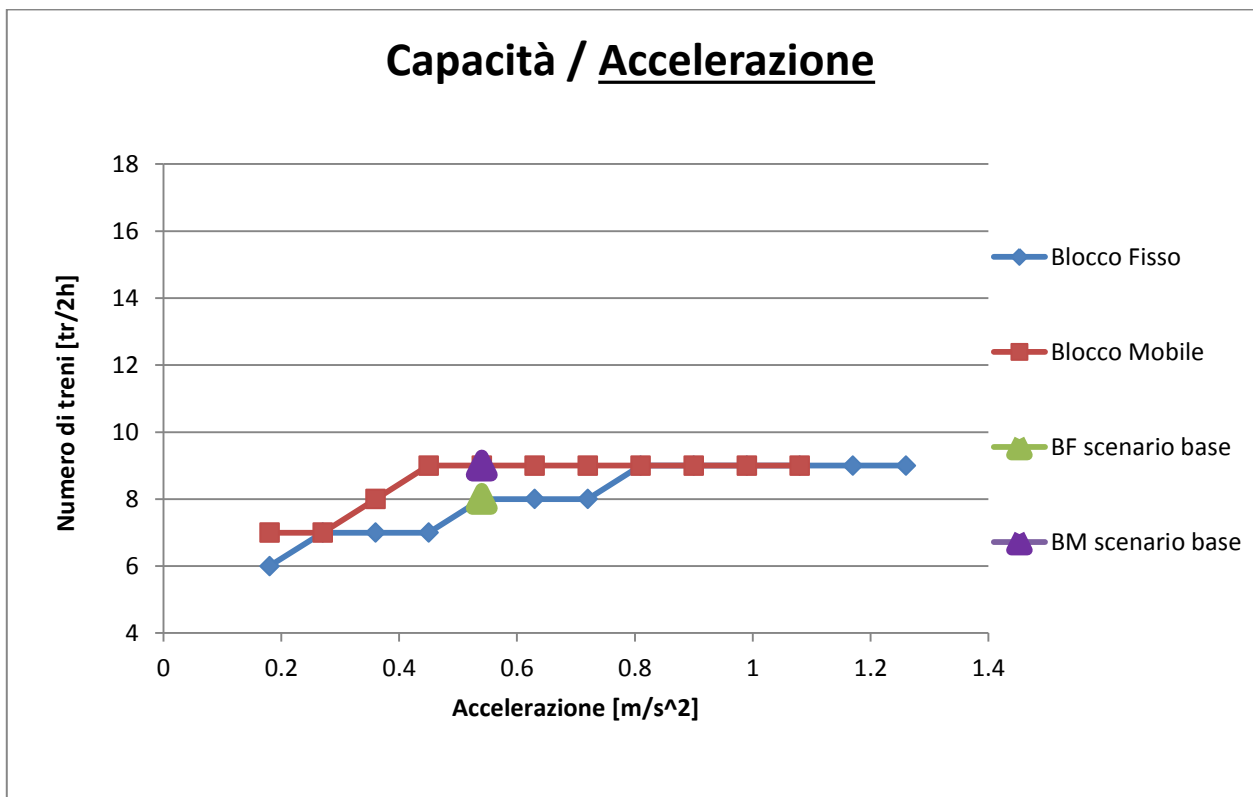


Grafico 7.3.26: Confronto al variare dell'accelerazione di servizio - linea tradizionale

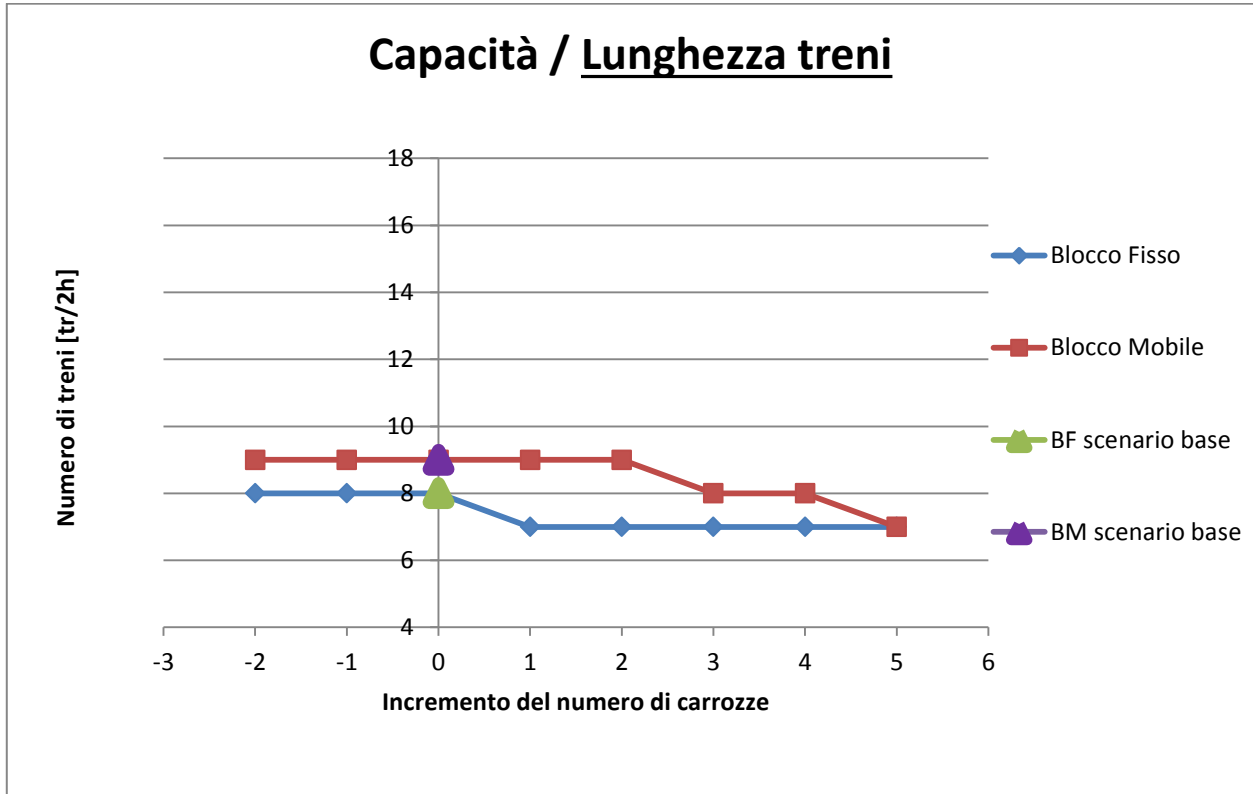


Grafico 7.3.27: Confronto al variare della lunghezza dei treni- linea tradizionale

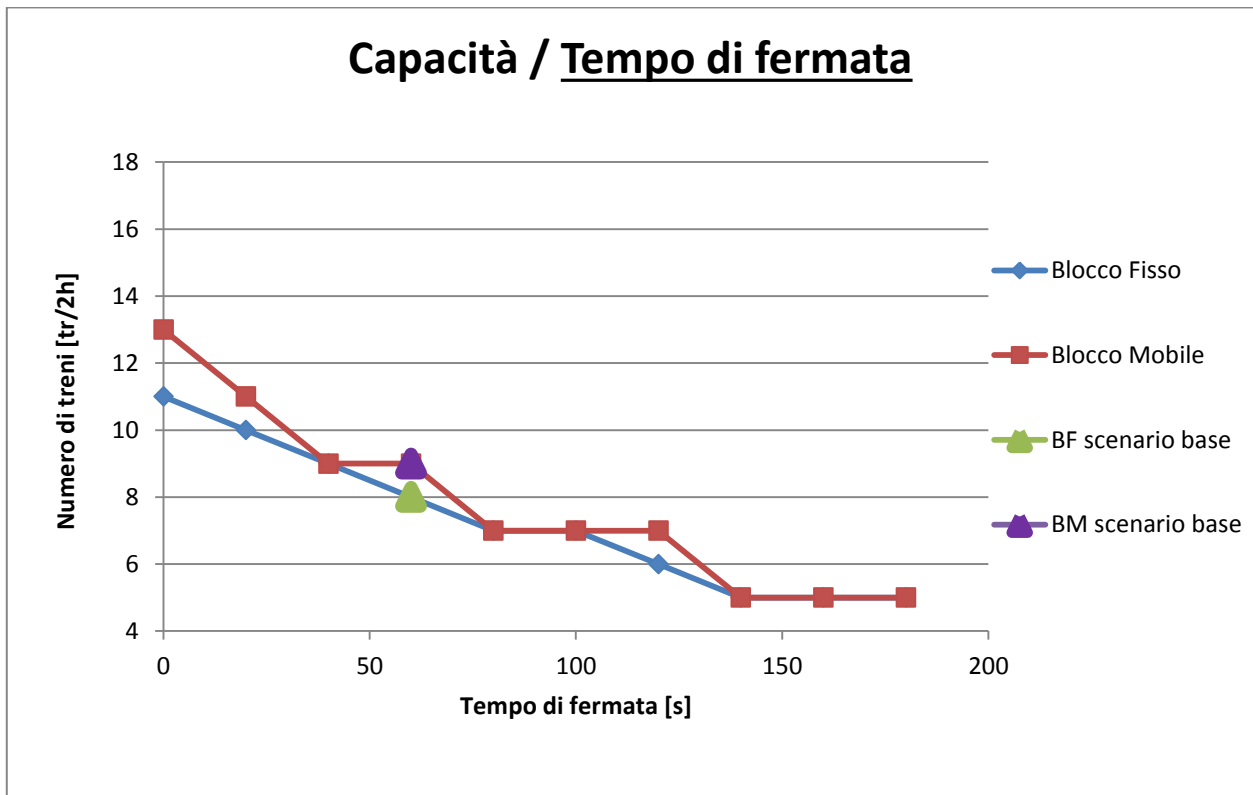


Grafico 7.3.28: Confronto al variare del tempo di fermata - linea tradizionale

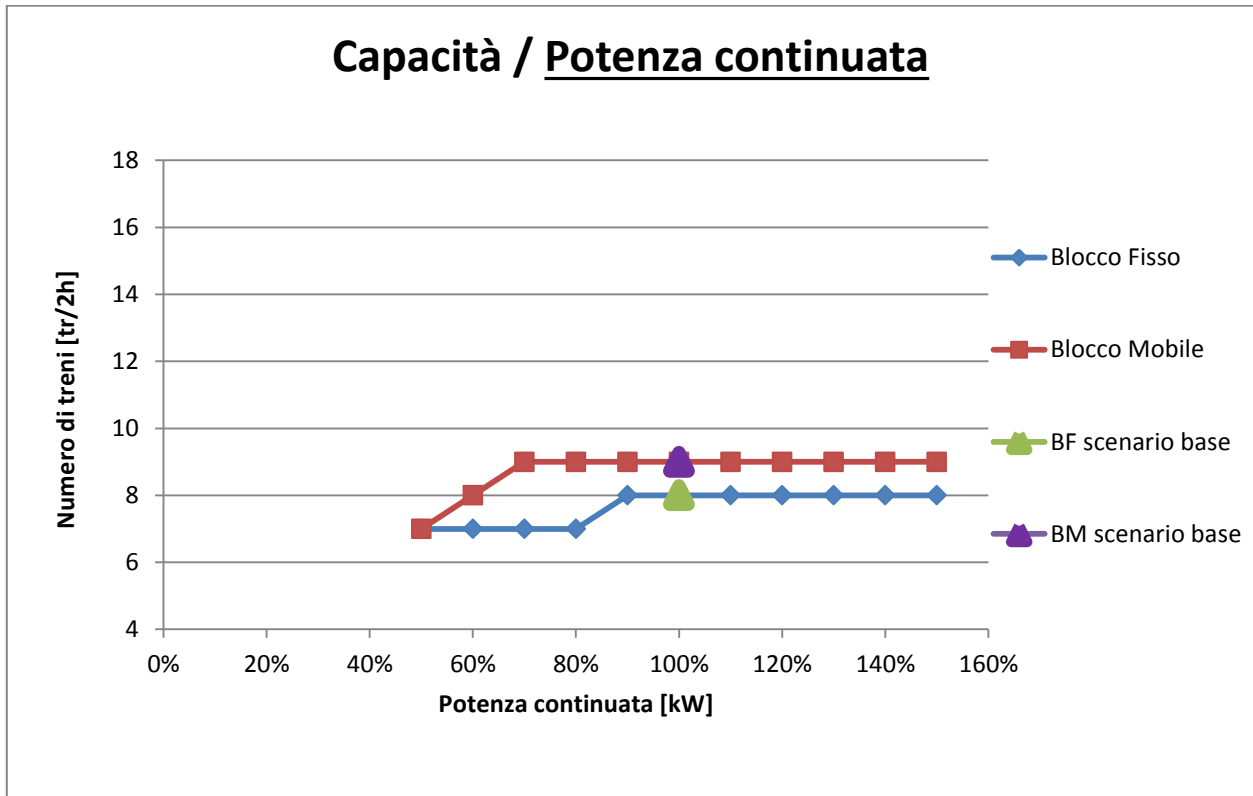


Grafico 7.3.29: Confronto al variare della potenza continuata- linea tradizionale

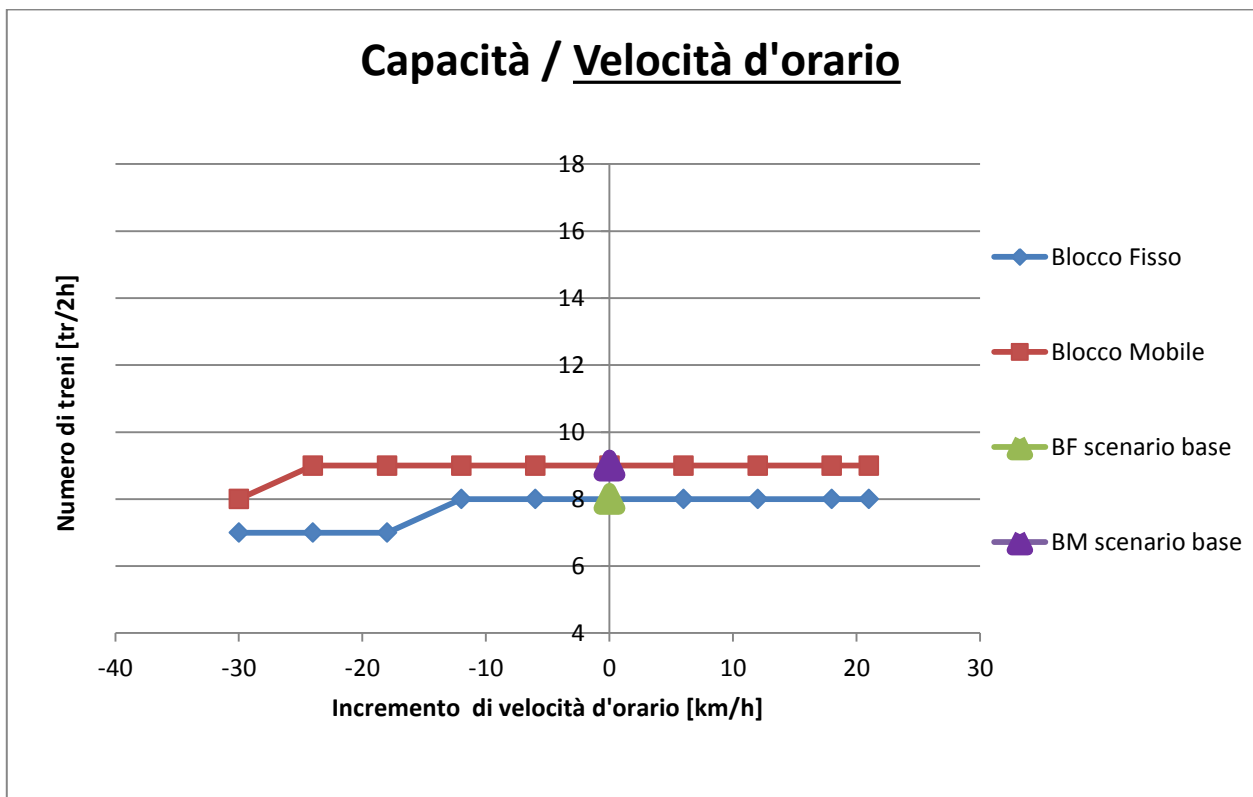


Grafico 7.3.30: Confronto al variare dell'incremento della velocità d'orario - linea tradizionale

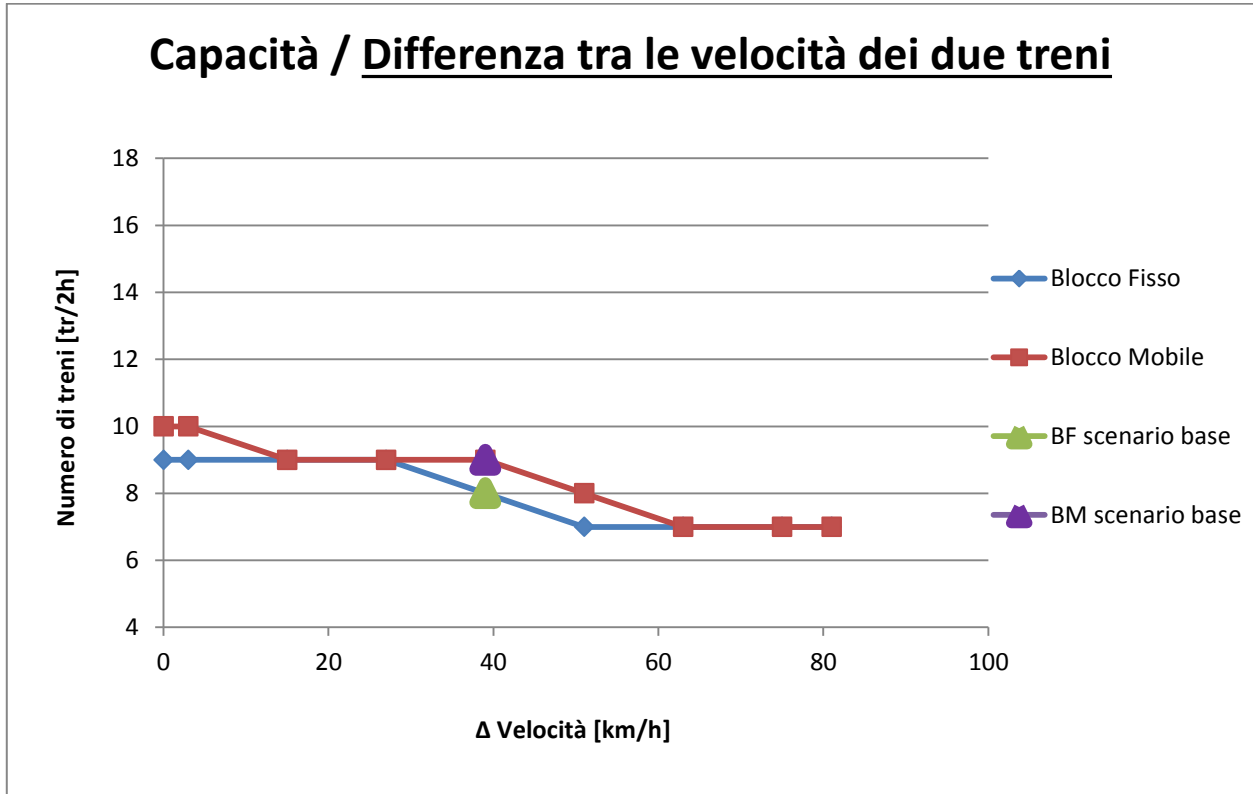


Grafico 7.3.31: Confronto al variare della differenza tra le velocità dei due treni - linea tradizionale

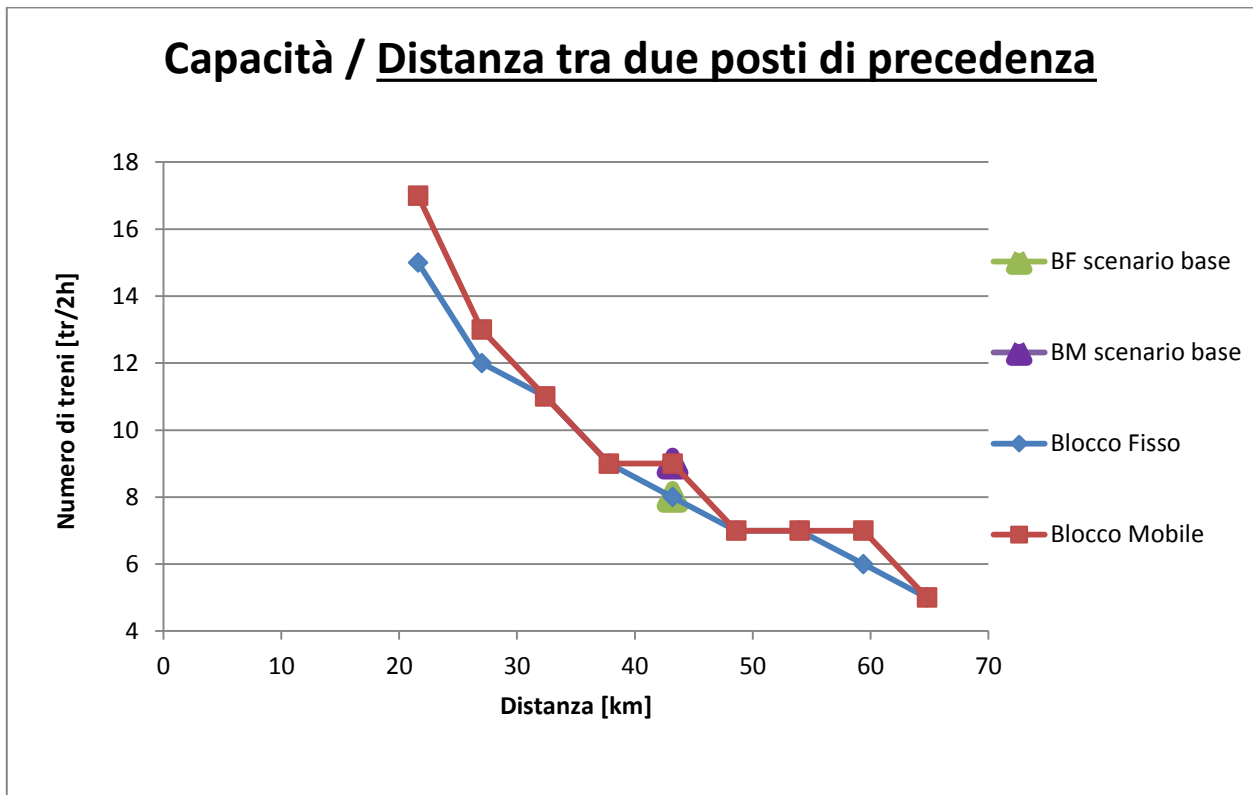


Grafico 7.3.32: Confronto al variare della distanza tra i due posti di precedenza - linea tradizionale

Per quanto riguarda l'accelerazione si vede come, per valori elevati, la capacità della linea con Blocco Fisso sia uguale a quella con Blocco Mobile. Il Blocco Fisso viene utilizzato in maniera più efficiente dato che l'elevata accelerazione permette di raggiungere la velocità di regime in un tempo minore e quindi la sezione di blocco percorsa in accelerazione viene occupata per minor tempo.

Per elevati tempi di fermata in stazione (superiori a 80 secondi), il numero massimo di treni/ora non cambia tra i due sistemi di distanziamento. Fermate lunghe del Suburbano esaltano la diversità delle due tracce e quindi l'eterotachia del traffico, condizionando in modo decisivo la capacità. Riducendo invece i tempi di fermata, si ottengono tracce più simili e si possono tornare ad apprezzare i vantaggi dell'utilizzo di un distanziamento a Blocco Mobile.

Sulla scia di quanto detto, ci si aspetta che in generale una maggiore eterotachia appiattisca la differenza tra i due sistemi di distanziamento, mentre il Blocco Mobile dovrebbe offrire prestazioni migliori quando le tracce sono più omogenee. Pertanto, al diminuire della differenza di velocità tra i due treni (minore eterotachia), ci si aspetta dai due sistemi prestazioni differenti che dovrebbero invece poi avvicinarsi all'aumentare di questo parametro. Tuttavia, analizzando i risultati schematizzati nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, non si riscontra l'andamento descritto precedentemente ma, anzi, le due curve sono circa coincidenti in tutto il dominio. Ci si rende conto che a determinare la capacità è il tempo e il numero delle fermate del treno Suburbano piuttosto che la differenza tra la sua velocità di regime (tenuta per un tempo esiguo rispetto al tempo totale di viaggio) e quella dell'Eurocity.

Dall'analisi della **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, si nota come al diminuire della distanza tra due posti di precedenza, la forbice di capacità tra Blocco Fisso e Blocco Mobile tende ad aumentare. Questo perché con precedenza più frequenti lungo la linea è possibile avere un numero di treni/ora maggiore e quindi il vantaggio anche piccolo che può dare l'utilizzo del Blocco Mobile (che si ha solamente nei punti di contatto tra le due tracce) si ripete per gli n treni inseriti. Pertanto, all'aumentare del numero dei treni, è più probabile che questo risparmio di tempo di occupazione di infrastruttura sia sufficiente a consentire l'inserimento di un'ulteriore traccia.

7.3.4 Potenziamento del Blocco Fisso

Sul tratto di linea studiato, è possibile far circolare, nella situazione di base, 9 treni in due ore, grazie all'utilizzo del distanziamento a Blocco Mobile. Si studiano delle modifiche e degli interventi che, applicati sul sistema a Blocco Fisso, possano eguagliare le prestazioni offerte dal Blocco Mobile. Grazie allo studio compiuto sui singoli parametri utilizzati, è stato possibile scegliere quali di essi variare simultaneamente per ottenere il risultato voluto. I parametri studiati possono essere suddivisi in *caratteristiche di linea e prestazioni del segnalamento*, in *caratteristiche di accessibilità delle vetture* e in *caratteristiche meccaniche del materiale rotabile*. Pertanto sono stati studiati tre casi di potenziamento del Blocco Fisso corrispondenti alle tre sottocategorie di parametri individuati. Agendo su di essi si sono cercate le condizioni grazie alle quali poter raggiungere i risultati ottenuti con il distanziamento a Blocco Mobile: 9 treni/2ore e tempo di occupazione dell'infrastruttura di 86.0 minuti (71.7% della finestra temporale).

7.3.4.1 Potenziamento della linea e del segnalamento

Tra i parametri considerati nel lavoro, quelli che sono riferibili all'infrastruttura ferroviaria e al sistema di distanziamento sono i tempi tecnici, i limiti di velocità e la distanza tra due posti di precedenza. I limiti di velocità sono stati mantenuti invariati, sia per la loro scarsa incisività, sia perché la loro variazione richiede di adeguare i franchi di sicurezza. Si è programmato di studiare la capacità incrementando progressivamente gli altri due parametri, tempi tecnici e distanza tra due posti di precedenza, a partire dal parametro che tra i due risulta più determinante, ossia il secondo. Eseguendo una serie di prove grazie al software realizzato si è rilevato che è sufficiente ridurre la distanza tra i posti di precedenza da 1 ogni 8 stazioni (43.2 km) a 1 ogni 7 (37.8 km).

Intervento	Variazione	Massimo numero di treni/2ore	Tempo di occupazione infrastruttura [min]
Distanza tra 2 posti di precedenza	43.2 km --> 37.8 km	8 --> 9	88.0 --> 83.0

Tabella 7.3.30: Contributo dell'intervento di potenziamento linea – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato

Di seguito si riporta la tabella che raffronta le due possibili modalità con cui ottenere un incremento di capacità rispetto alla versione base del distanziamento a Blocco Fisso.

Distanziamento	Numero di treni/2ore	Tempo di occupazione	% Tempo di
----------------	----------------------	----------------------	------------

		infrastruttura [min]	occupazione infrastruttura
BF base	8	88.0	74.1 %
Potenziamento BF (linea)	9	83.0	69.1 %
BM base	9	86.0	71.7 %

Tabella 7.3.31: Evoluzione della situazione base a due scenari alternativi: potenziamento della linea e BM – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato

Non è stato necessario agire sui tempi tecnici in quanto la sola riduzione della distanza tra due posti di precedenza, di una lunghezza pari a quella interstazionale, permette di raggiungere le prestazioni offerte dal Blocco Mobile nella versione di base. In alternativa è possibile intervenire sul materiale rotabile.

7.3.4.2 *Potenziamento delle caratteristiche di accessibilità delle vetture*

Il miglioramento dell'accessibilità delle vetture ferroviarie permette una velocizzazione delle operazioni di salita e discesa dei passeggeri, rendendo possibili tempi di fermata inferiori e quindi tracce più veloci. Questo può essere realizzato con vetture dotate di pianale ribassato e di un numero più elevato di porte, aventi sistemi di apertura/chiusura più rapidi.

Intervento	Variazione	Massimo numero di treni/2ore	Tempo di occupazione infrastruttura [min]
Tempo di fermata	60 s --> 40 s	8 --> 9	88.0 --> 83.6

Tabella 7.3.32: Contributo dell'intervento di miglioramento dell'accessibilità – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato

Di seguito si riporta la tabella che raffronta le due possibili modalità con cui ottenere un incremento di capacità rispetto alla versione base del distanziamento a Blocco Fisso.

Distanziamento	Numero di treni/2ore	Tempo di occupazione infrastruttura [min]	% Tempo di occupazione infrastruttura
BF base	8	88.0	74.1 %
Potenziamento BF (tempo di fermata)	9	83.6	69.7 %
BM base	9	86.0	71.7 %

Tabella 7.3.33: Evoluzione della situazione base a due scenari alternativi: miglioramento dell'accessibilità e BM – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato

Questo intervento è sufficiente per ottenere la stessa potenzialità offerta dalla versione base del Blocco Mobile.

7.3.4.3 *Potenziamento delle caratteristiche meccaniche materiale rotabile*

Il materiale rotabile si differenzia per accelerazione massima, lunghezza del treno, potenza continuata e velocità d'orario. Si è deciso di procedere progressivamente con la variazione dei due parametri più incidenti, velocità d'orario ed accelerazione, dando priorità a quest'ultima in quanto dallo studio precedente risultava la più determinante tra le due. Per quanto riguarda la velocità d'orario, un aumento di quella del treno Suburbano permette di rendere più omogeneo il traffico; si è però deciso di non penalizzare gli Eurocity, dei quali è stata mantenuta immutata la velocità massima di servizio.

Intervento	Variazione	Massimo numero di treni/2ore	Tempo di occupazione infrastruttura [min]
Accelerazione [m/s ²]	0.54 --> 0.72	8 --> 9	88.0 --> 86.4
Velocità d'orario del Suburbano [km/h]	120 --> 132		

Tabella 7.3.34: Contributo degli interventi di potenziamento materiale rotabile applicati simultaneamente – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato

Di seguito si riporta la tabella che raffronta le due possibili modalità con cui ottenere un incremento di capacità rispetto alla versione base del distanziamento a Blocco Fisso.

Distanziamento	Numero di treni/2ore	Tempo di occupazione infrastruttura [min]	% Tempo di occupazione infrastruttura
BF base	8	88.0	74.1 %
Potenziamento BF (caratteristiche meccaniche)	9	86.4	72.0 %
BM base	9	86.0	71.7 %

Tabella 7.3.35: Evoluzione della situazione base a due scenari alternativi: potenziamento caratteristiche meccaniche e BM – linea tradizionale – Blocco Fisso Potenziato

Di seguito si riporta in un grafico l'andamento dei miglioramenti ottenibili variando i due parametri sino al risultato cercato (i valori target sono cerchiati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

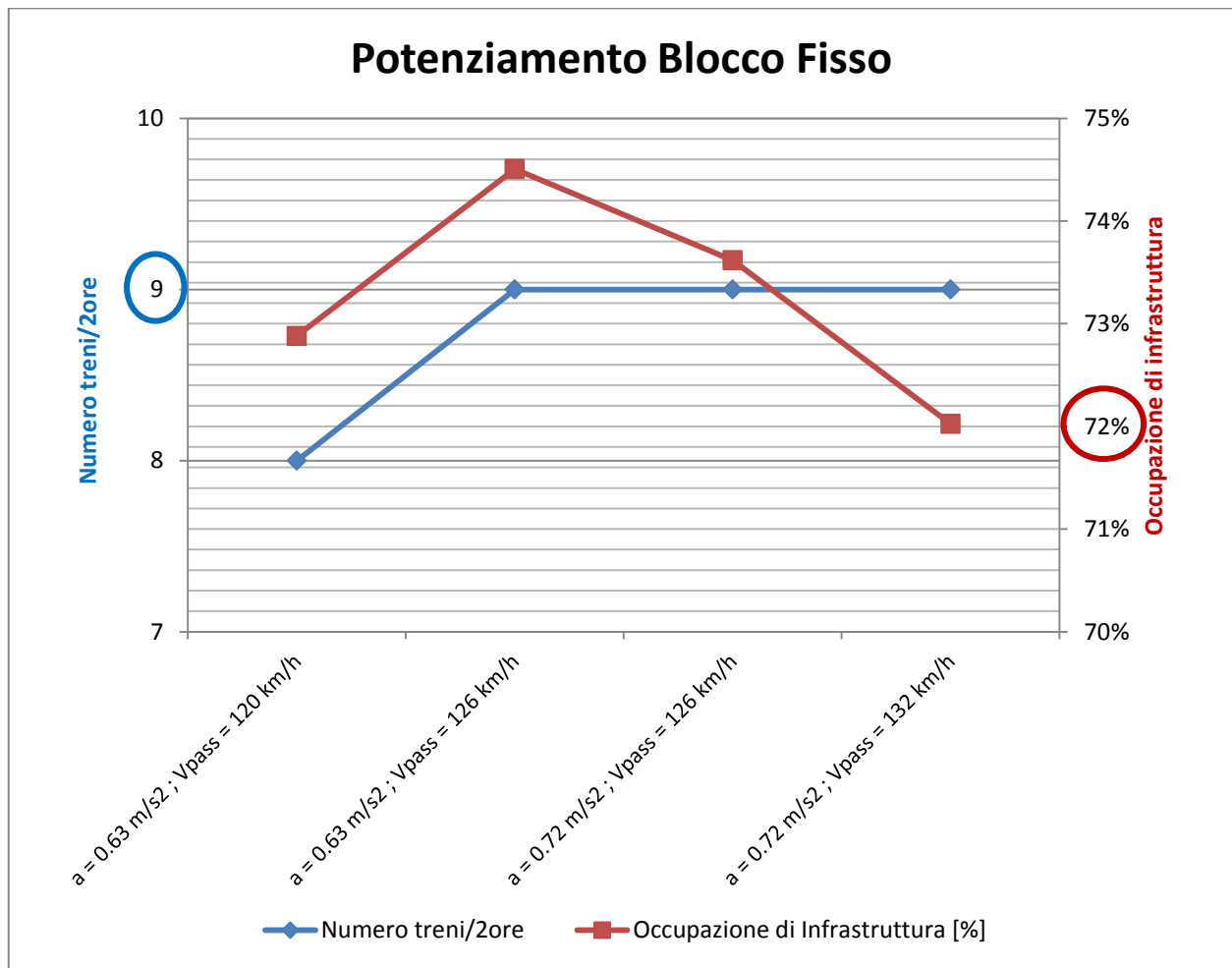


Grafico 7.3.33: Step di potenziamento delle caratteristiche meccaniche del materiale rotabile – linea tradizionale – Blocco Fisso

Potenziato

8 STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEI RITARDI DI SCENARI IDEALI

8.1 Linea Suburbana

Si è considerato che in caso di guasto, di interruzione di alimentazione elettrica o altro, nella maggior parte dei casi il treno, ovunque si trovi, riesce perlomeno a raggiungere la successiva stazione (date le ridotte distanze tra le fermate nella linea suburbana ideale considerata, paragrafo 7.1) in modo da facilitare l'evacuazione dei passeggeri. Pertanto si è deciso di assegnare il ritardo primario al treno quando questo si trova in stazione.

Dato che le tracce imperturbate dei treni si ripetono identicamente, è indifferente assegnare tale ritardo all'uno o all'altro treno in particolare. Invece la stazione in cui l'apposizione del ritardo genera conseguenze peggiori è la prima: infatti, in questo caso, i treni seguenti non sono liberi di entrare in linea (rimangono fermi in attesa appena prima) se non quando la prima sezione di blocco viene liberata. Porre tale ritardo in un'altra stazione darebbe modo di smaltire meglio la perturbazione.

8.1.1 Blocco Fisso

Nei grafici seguenti si riportano in ascissa i treni perturbati in ordine di apparizione sulla linea ed in ordinata il ritardo con cui si presentano in linea e quello con cui giungono al termine, a causa del ritardo primario del primo treno. Questi grafici vengono proposti a step di incremento di 2 treni/ora. Nel presente paragrafo è stato utilizzato il codice di calcolo basato sull'algoritmo di Figura 6.5.1.

Nel caso di 10 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 5 e la perturbazione si arresta dopo circa 29 minuti. In ascissa si riporta il numero di treni considerati in totale nell'analisi.

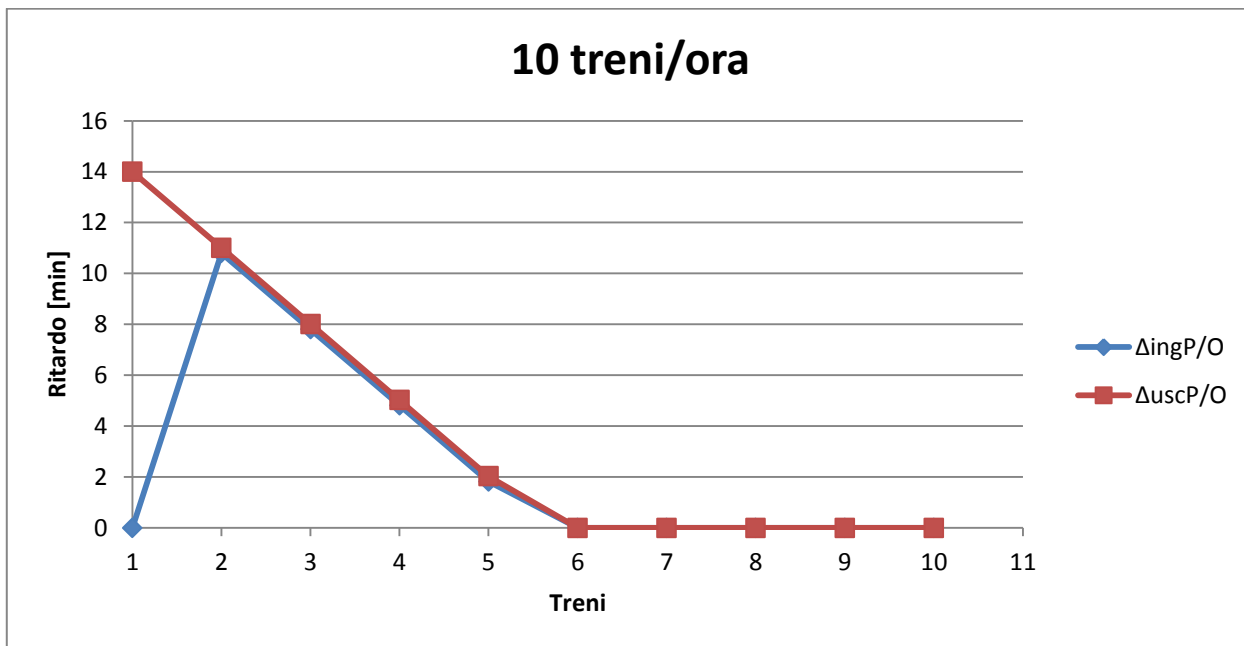


Grafico 8.1.1: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 10 tr/h

Nel caso di 12 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 7 e la perturbazione si arresta dopo circa 35 minuti.

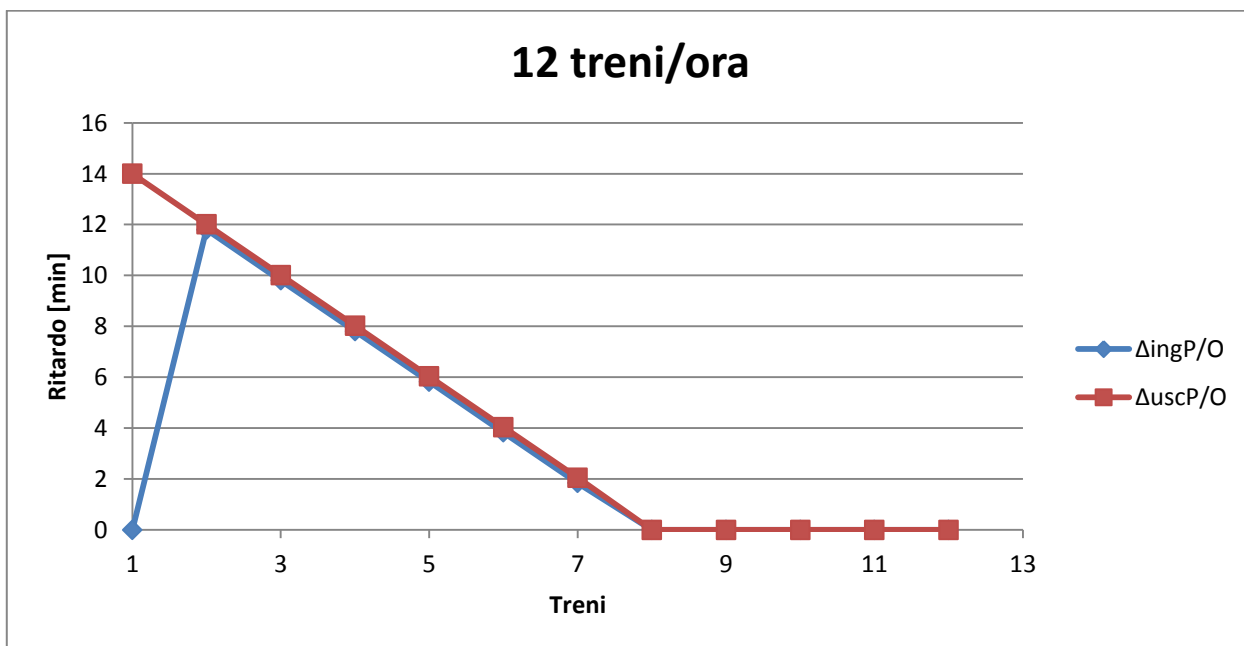


Grafico 8.1.2: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 12 tr/h

Nel caso di 14 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 11 e la perturbazione si arresta dopo circa 47 minuti.

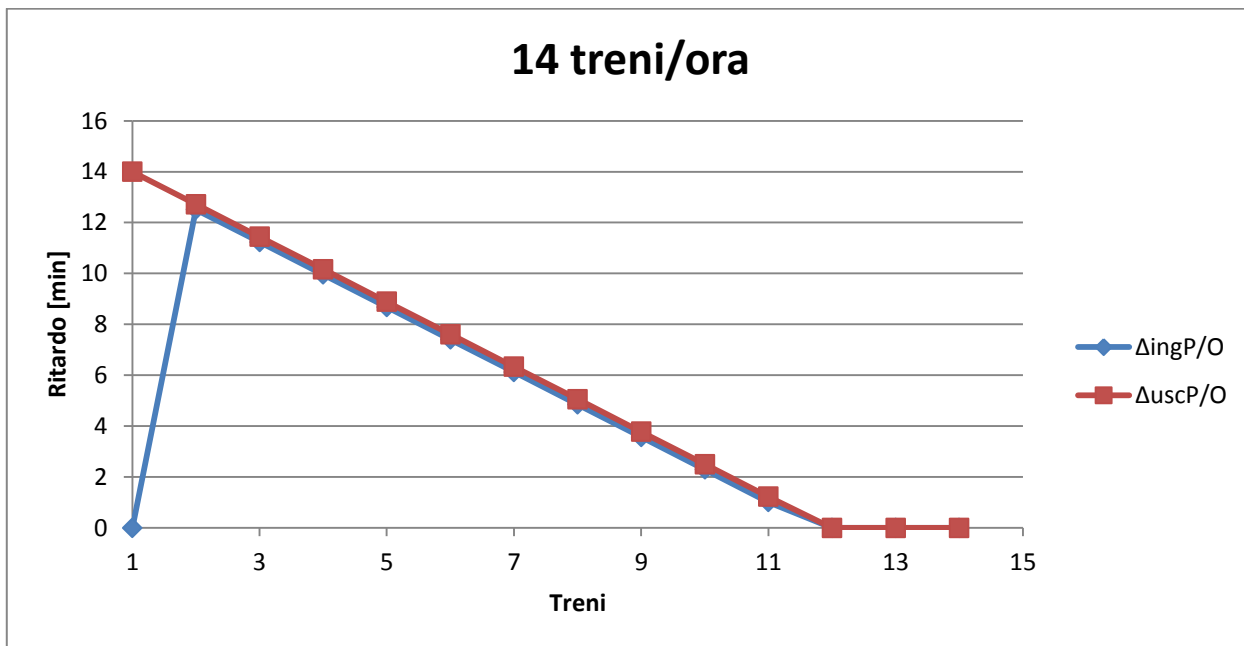


Grafico 8.1.3: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 14 tr/h

Nel caso di 16 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 19 e la perturbazione si arresta dopo circa 71 minuti.

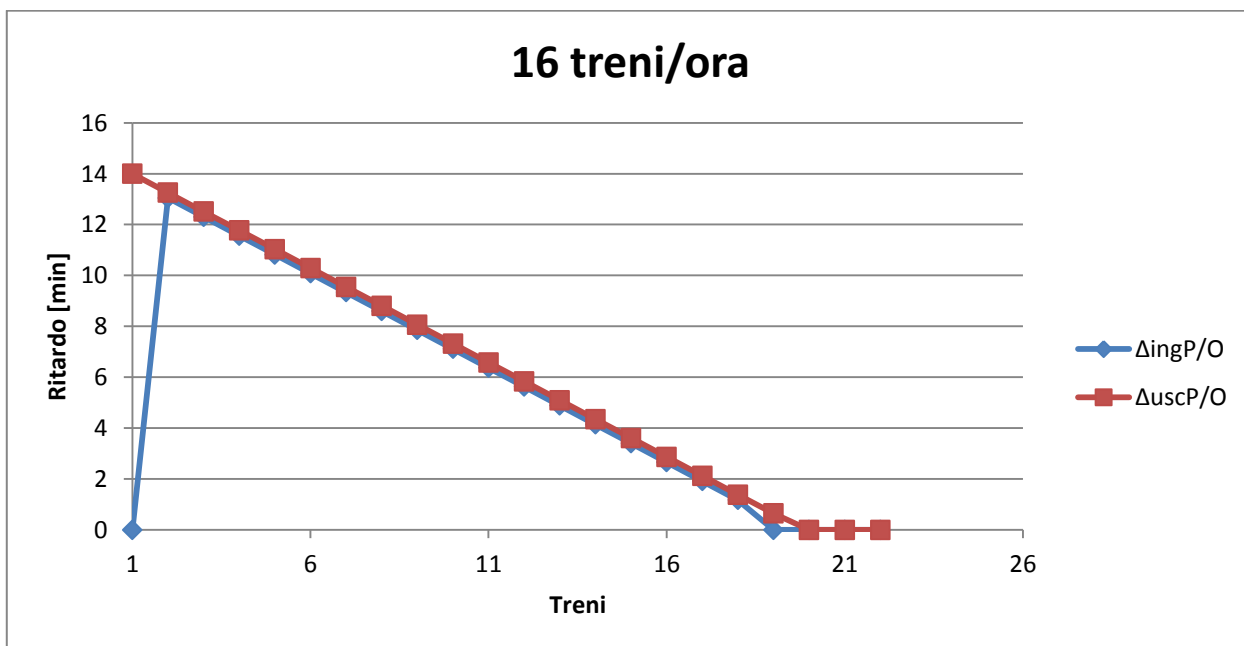


Grafico 8.1.4: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 16 tr/h

Nel caso di 18 treni/ora, che equivale alla capacità della linea garantendo i margini previsti dall’UIC CODE 406, i treni coinvolti dalla perturbazione sono 42 e la perturbazione si arresta dopo circa 140 minuti.

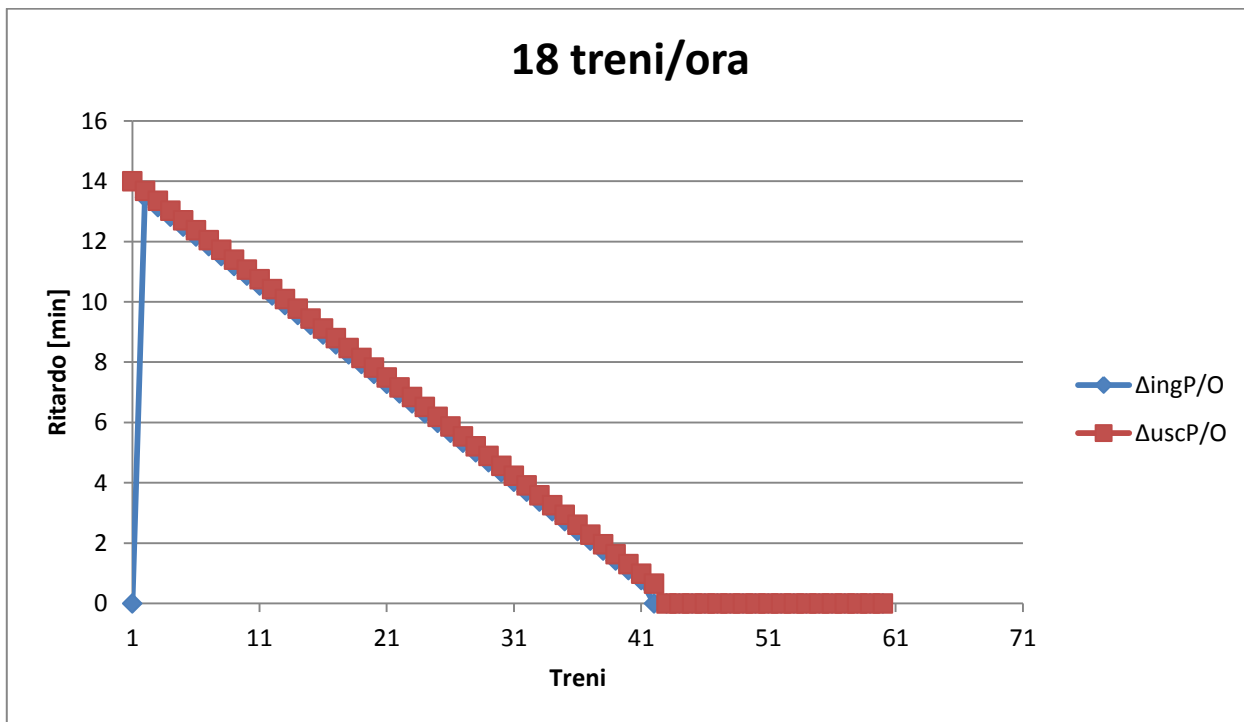


Grafico 8.1.5: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 18 tr/h

Si osserva che il ritardo che i treni seguenti al primo hanno in ingresso sono gli stessi con cui arrivano al termine della linea. Questo perché i treni dal 2° in poi trovano immediatamente la prima sezione occupata (perché il primo treno ha ritardo primario nella prima stazione, che è nella prima sezione di blocco), pertanto possono entrare soltanto quando essa viene liberata, e a quel punto proseguono indisturbati fino al termine.

Provando ad aumentare il numero di treni/ora oltre la capacità, si ottiene che per 19 treni/ora i treni perturbati sono 91 con un tempo di durata della perturbazione di circa 4 ore e 48 minuti. Invece, con 20 treni/ora, la perturbazione non viene recuperata come si può vedere dal Grafico 8.1.6.

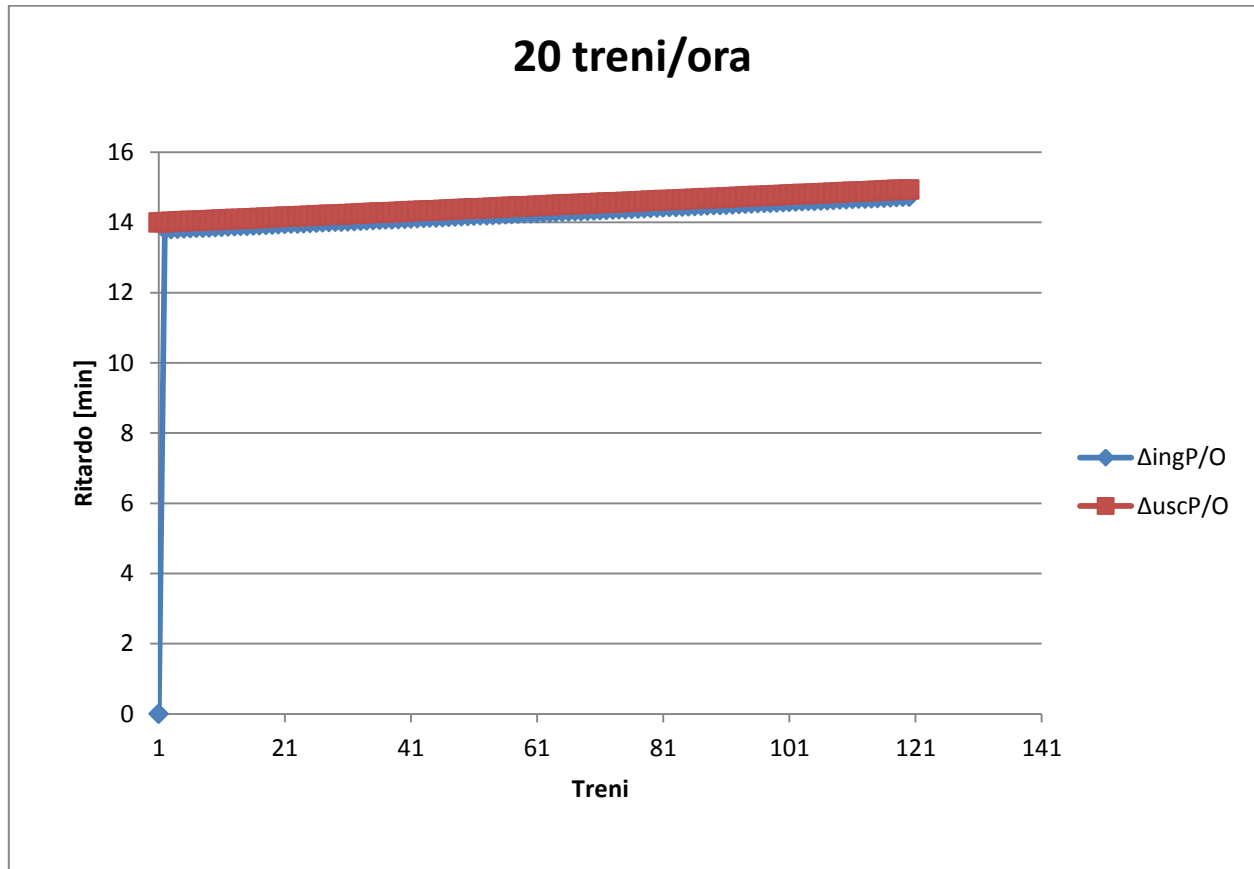


Grafico 8.1.6: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Fisso – 20 tr/h

In questo caso i margini non sono sufficienti al recupero del ritardo e quindi tutte le tracce risultano perturbate e l'entità del ritardo aumenta sempre. I treni sono costretti ad entrare in linea accelerando da velocità nulla. Se si compattassero le tracce dei treni imperturbati ma che partono da velocità nulla si otterrebbe come capacità teorica, considerando margini nulli, di 19 treni/ora. È evidente quindi che con 20 treni/ora il ritardo non potrà mai essere recuperato.

8.1.1.1 Sintesi de risultati

Tornando ai casi di cui si sono mostrati i grafici è possibile osservare l'andamento dei treni perturbati in funzione del numero di treni/ora previsti dall'orario. La situazione è stabile finché il numero di treni coinvolti è inferiore al numero di treni/ora, dopodiché esso cresce esponenzialmente.

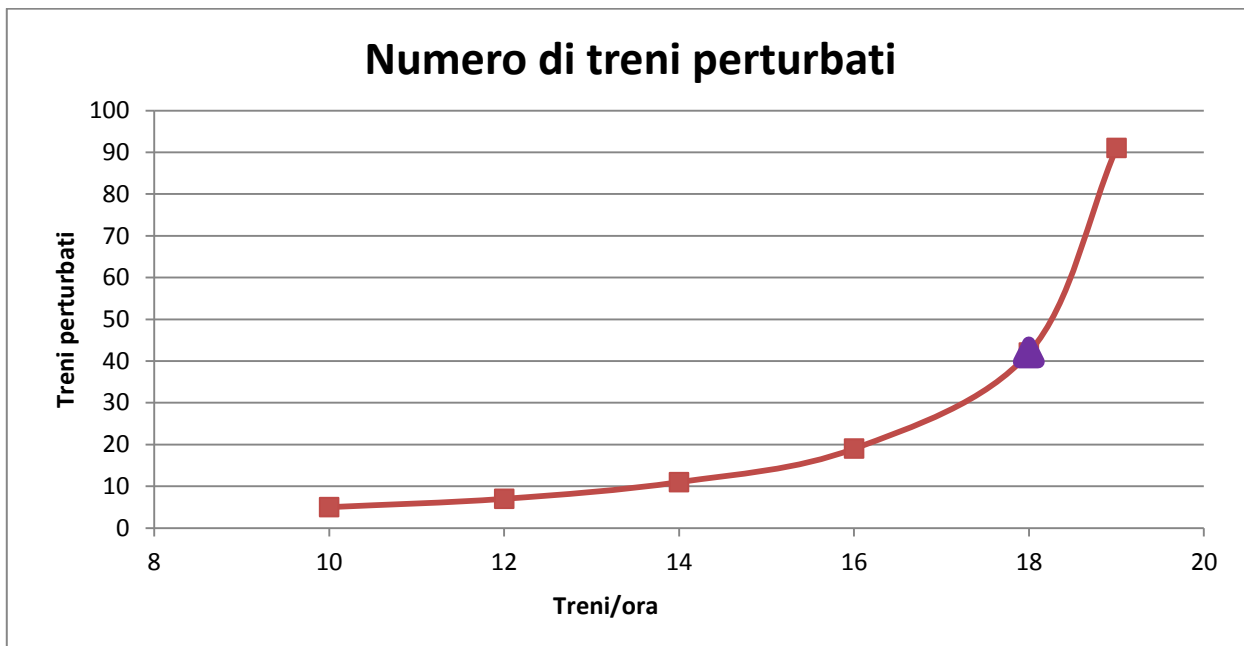


Grafico 8.1.7: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea suburbana – Blocco Fisso

Di seguito si riporta l'analogo grafico rappresentante l'andamento del tempo di durata della perturbazione.

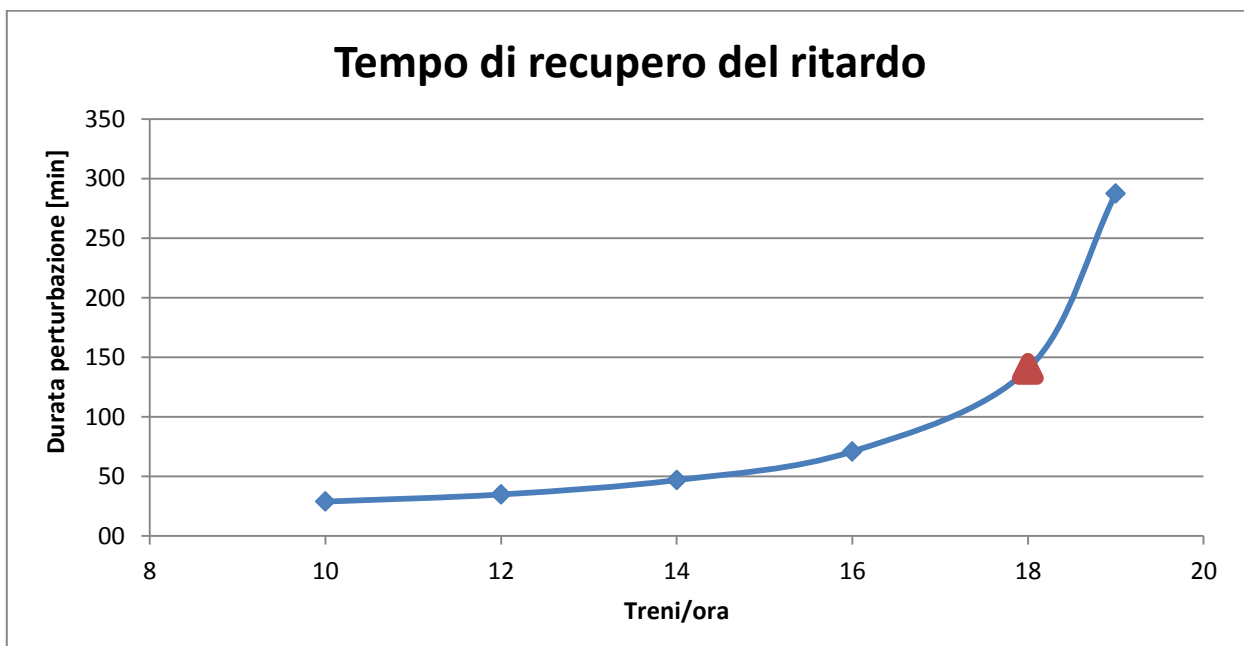


Grafico 8.1.8: Legame tra tempo di recupero della perturbazione e treni/ora – linea suburbana – Blocco Fisso

Anche in esso si riscontra una tendenza di crescita esponenziale per lo stesso numero di treni/ora per cui si ha questo comportamento nel Grafico 8.1.7.

8.1.2 Blocco Mobile

Nei grafici seguenti si riporta in ascissa i treni perturbati in ordine di apparizione sulla linea ed in ordinata il ritardo con cui si presentano in linea e il ritardo con cui giungono al termine, a causa del ritardo primario del primo treno. Questi grafici derivano da prove eseguite con step progressivi di incremento di 2 treni/ora. Nel presente paragrafo è stato utilizzato il codice di calcolo basato sull'algoritmo di Figura 6.5.2.

Nel caso di 10 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 4 e la perturbazione si arresta dopo circa 24 minuti.

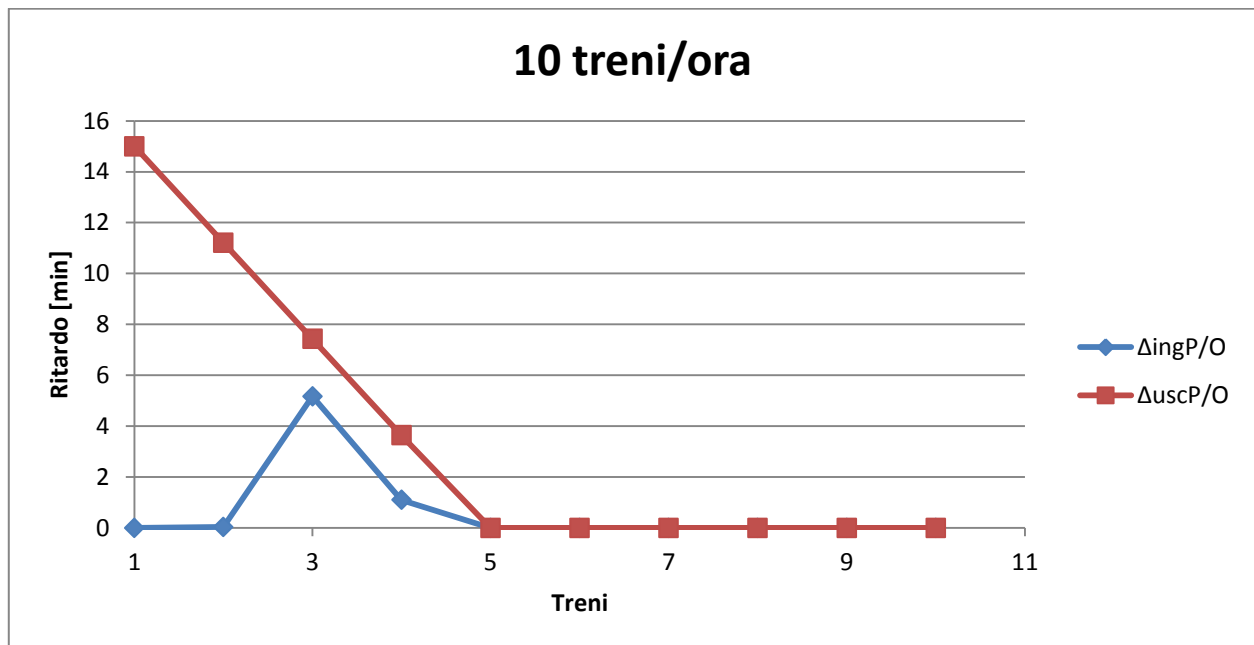


Grafico 8.1.9: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 10 tr/h

Nel caso di 12 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 6 e la perturbazione si arresta dopo circa 28 minuti.

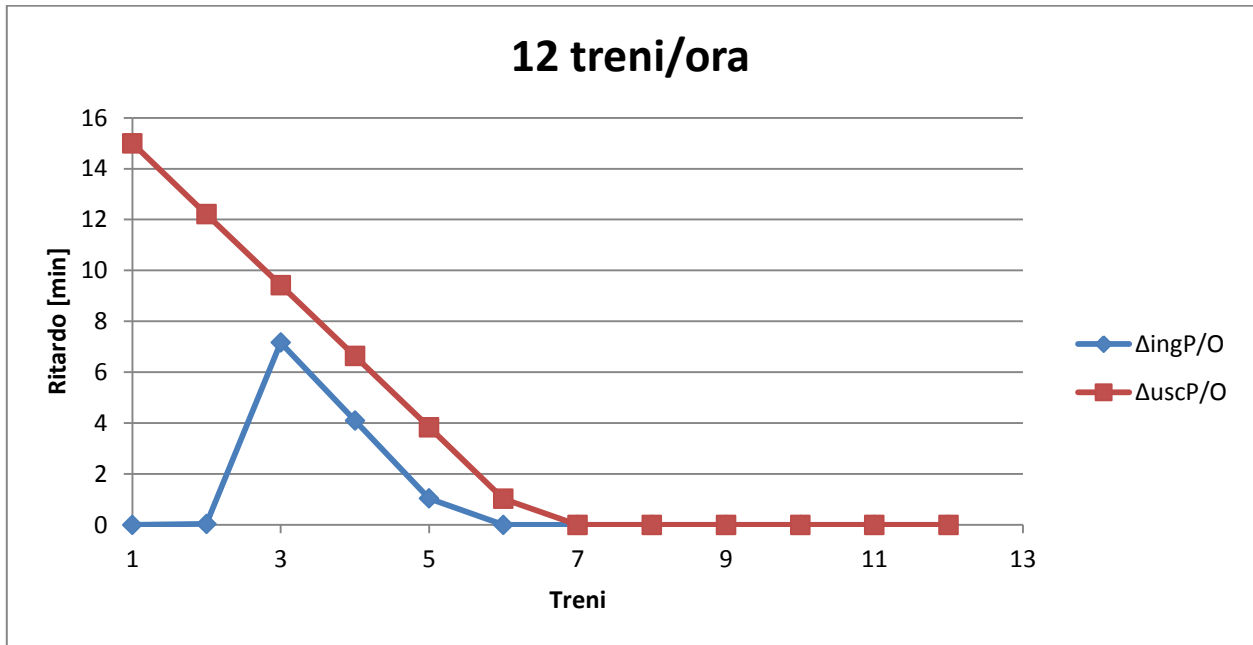


Grafico 8.1.10: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 12 tr/h

Nel caso di 14 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 8 e la perturbazione si arresta dopo circa 33 minuti.

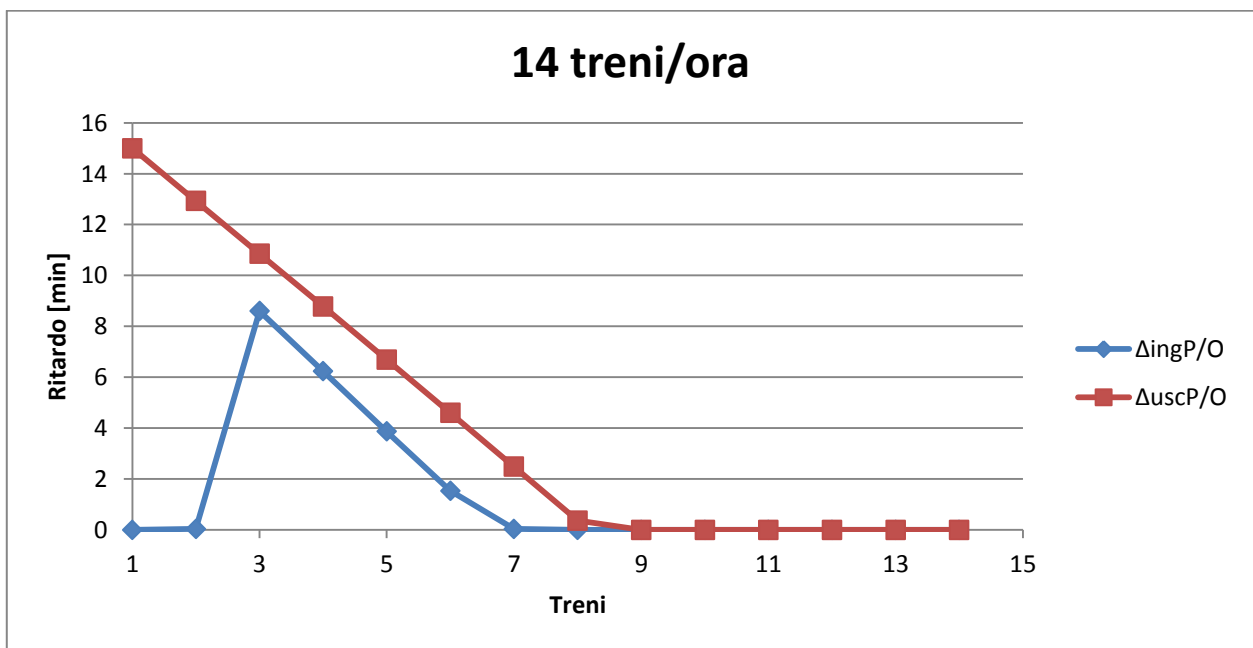


Grafico 8.1.11: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 14 tr/h

Nel caso di 16 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 10 e la perturbazione si arresta dopo circa 37 minuti.

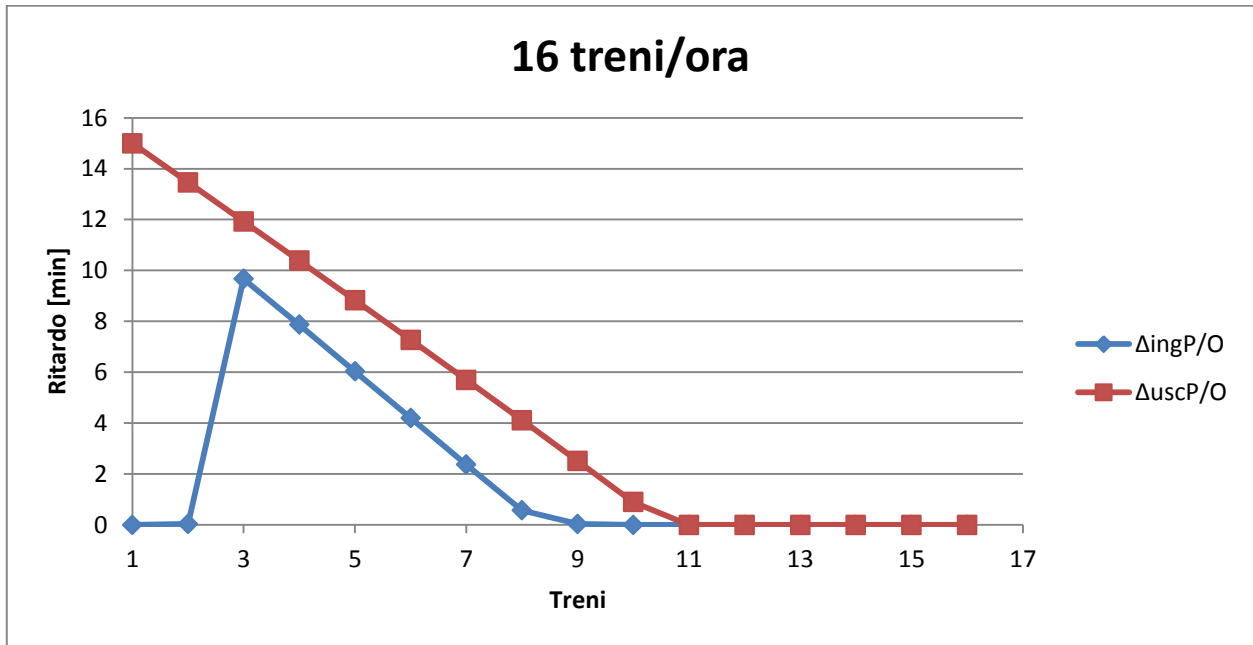


Grafico 8.1.12: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 16 tr/h

Nel caso di 18 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 13 e la perturbazione si arresta dopo circa 43 minuti.

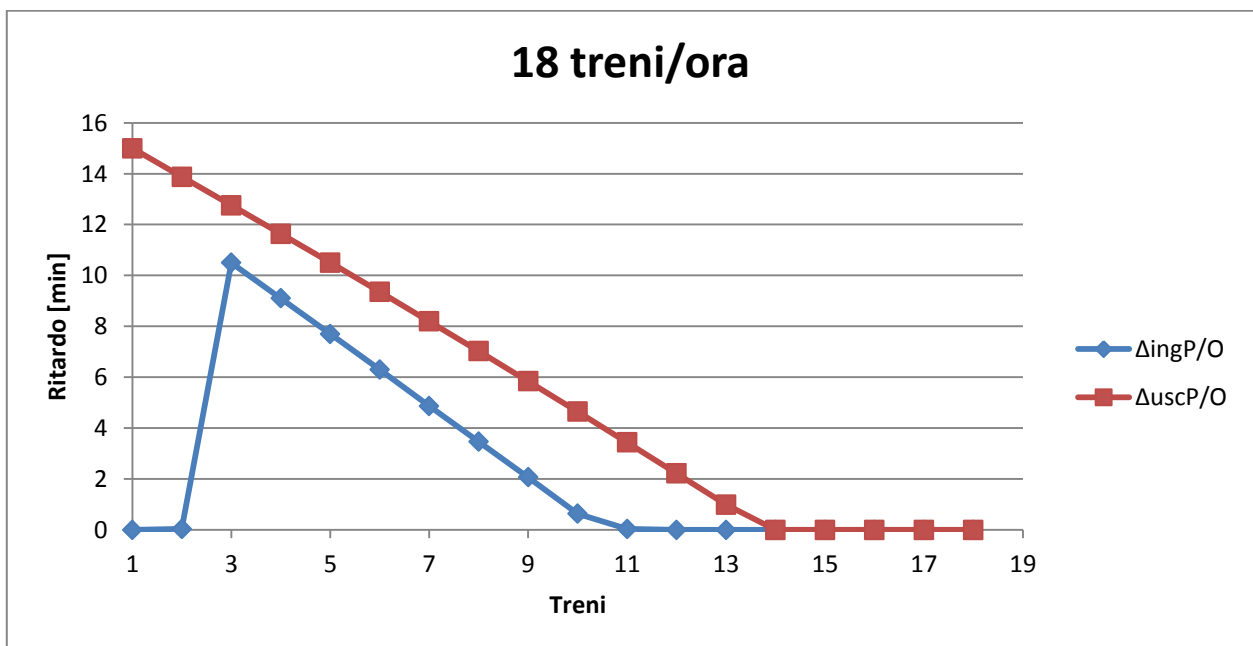


Grafico 8.1.13: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 18 tr/h

Nel caso di 20 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 18 e la perturbazione si arresta dopo circa 53 minuti.

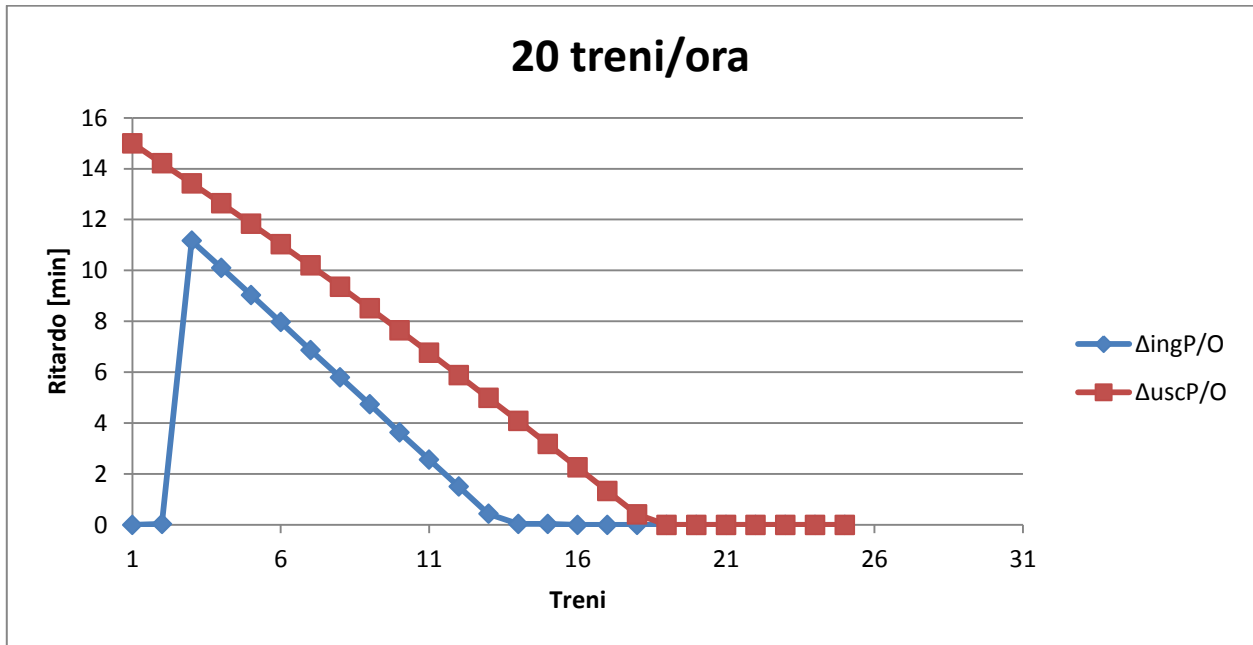


Grafico 8.1.14: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 20 tr/h

Nel caso di 22 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 25 e la perturbazione si arresta dopo circa 68 minuti.

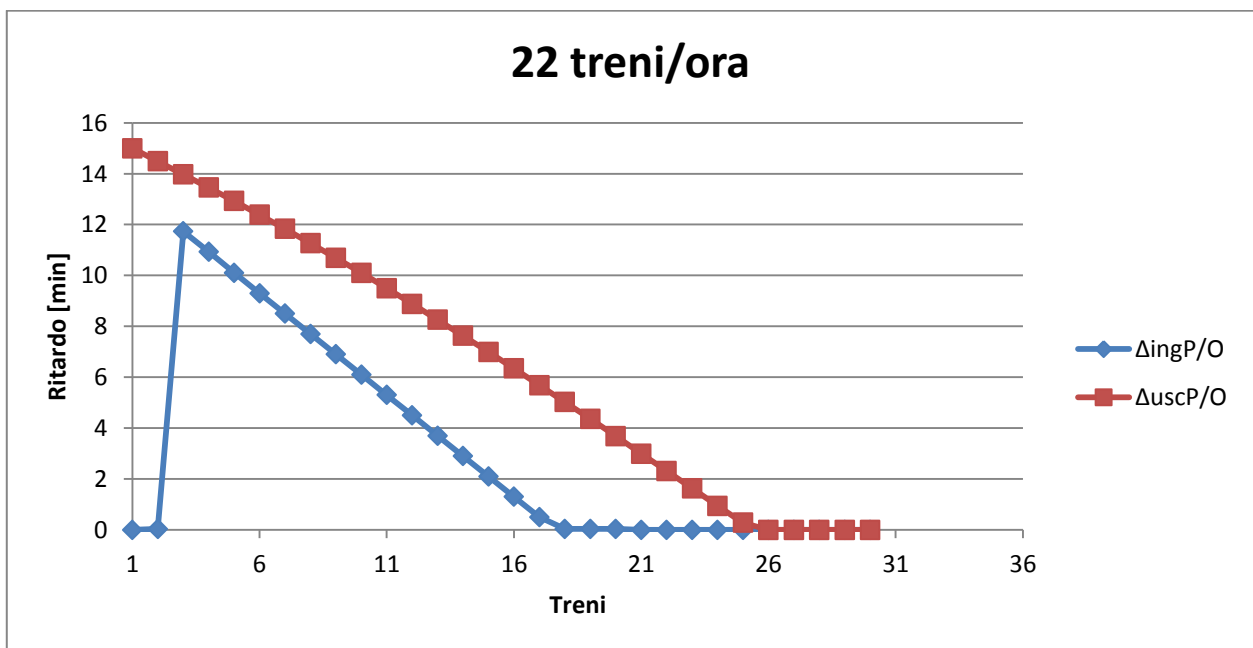


Grafico 8.1.15: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 22 tr/h

Nel caso di 24 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 37 e la perturbazione si arresta dopo circa 92 minuti.

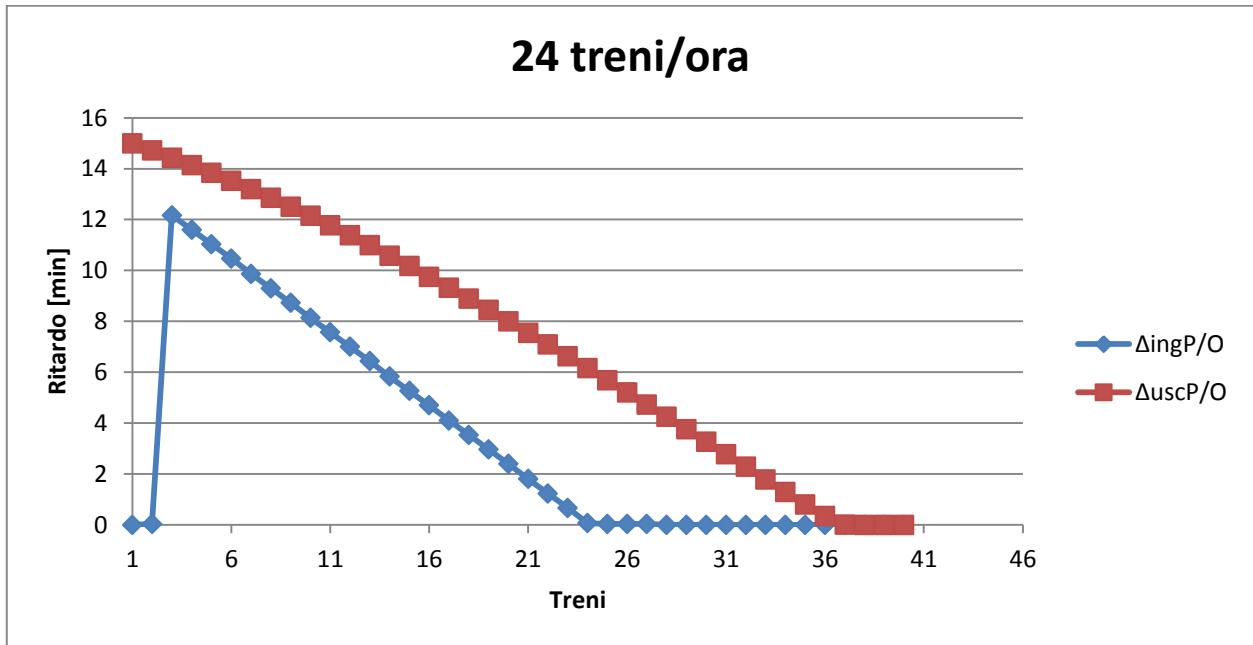


Grafico 8.1.16: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 24 tr/h

Nel caso di 26 treni/ora i treni coinvolti dalla perturbazione sono 58 e la perturbazione si arresta dopo circa 132 minuti.

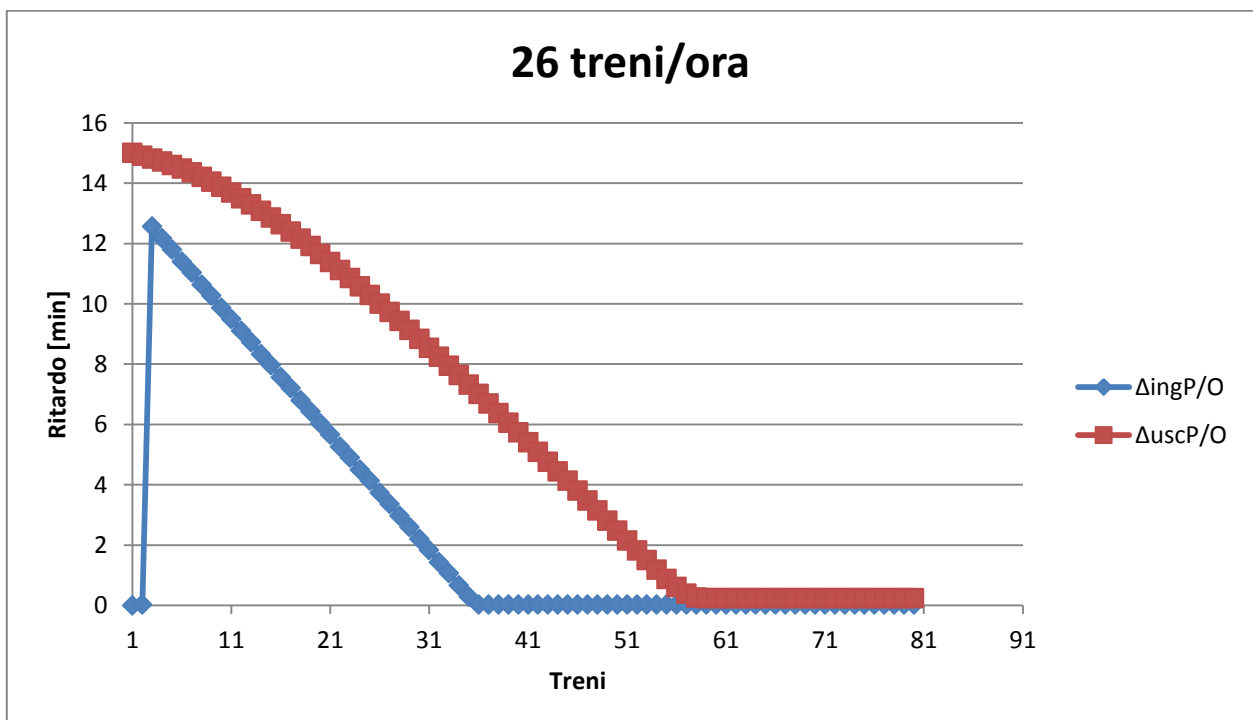


Grafico 8.1.17: Propagazione dei ritardi – linea suburbana – Blocco Mobile – 26 tr/h

In questo caso i treni dal 58° in poi giungono in ritardo a destinazione e tutti quanti con ritardo costante di 15 secondi. Questo deriva dal fatto che, anche senza alcun ritardo primario, un numero così elevato di treni/ora non può essere inserito nell'intervallo considerato perché la loro occupazione supera la capacità teorica della linea. Questo fa sì che nessun treno arrivi in orario e il rallentamento si protrae a catena per un numero infinito di treni, a prescindere dal fatto che si verifichi o meno un ritardo primario.

8.1.2.1 Sintesi dei risultati

Anche nel caso di Blocco Mobile si nota che la situazione è stabile finché il numero di treni coinvolti è inferiore a quello di treni/ora, dopodiché il numero di treni perturbati cresce esponenzialmente.

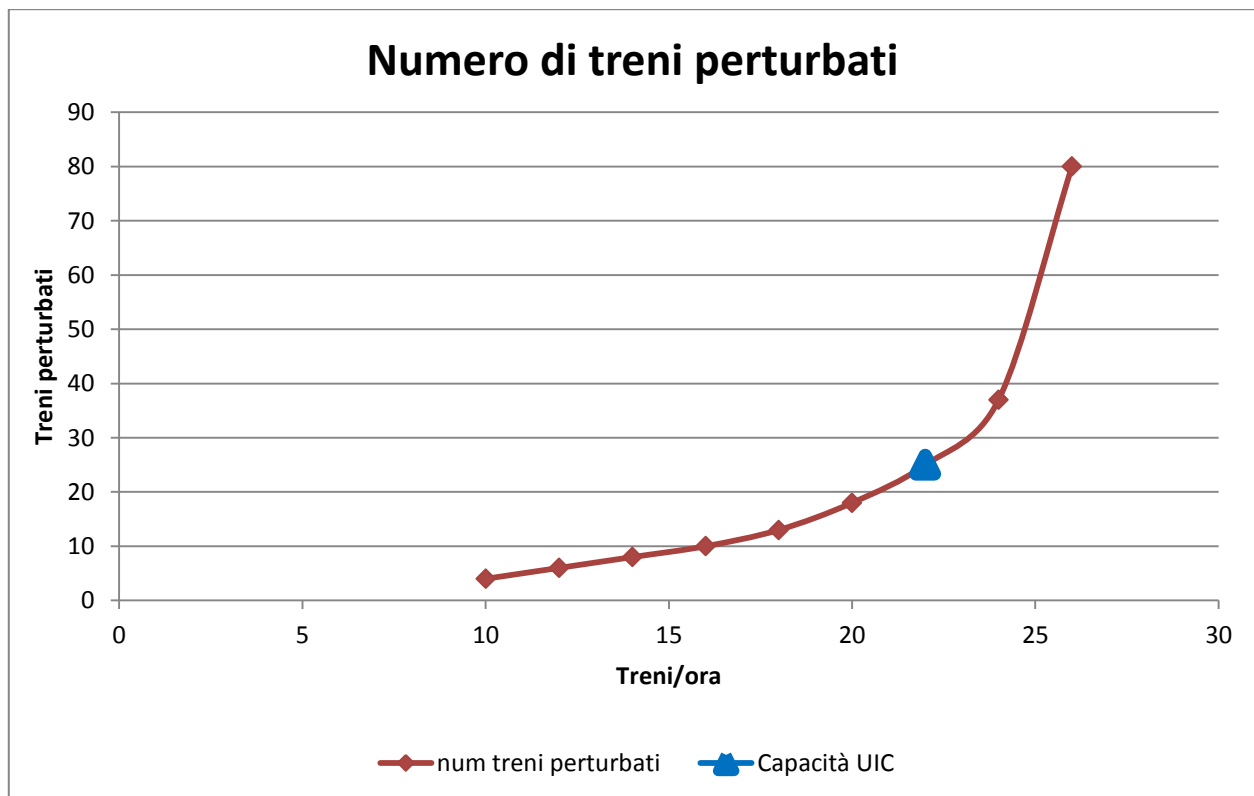


Grafico 8.1.18: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea suburbana – Blocco Mobile

Di seguito si riporta l'analogo grafico rappresentante l'andamento del tempo di durata della perturbazione.

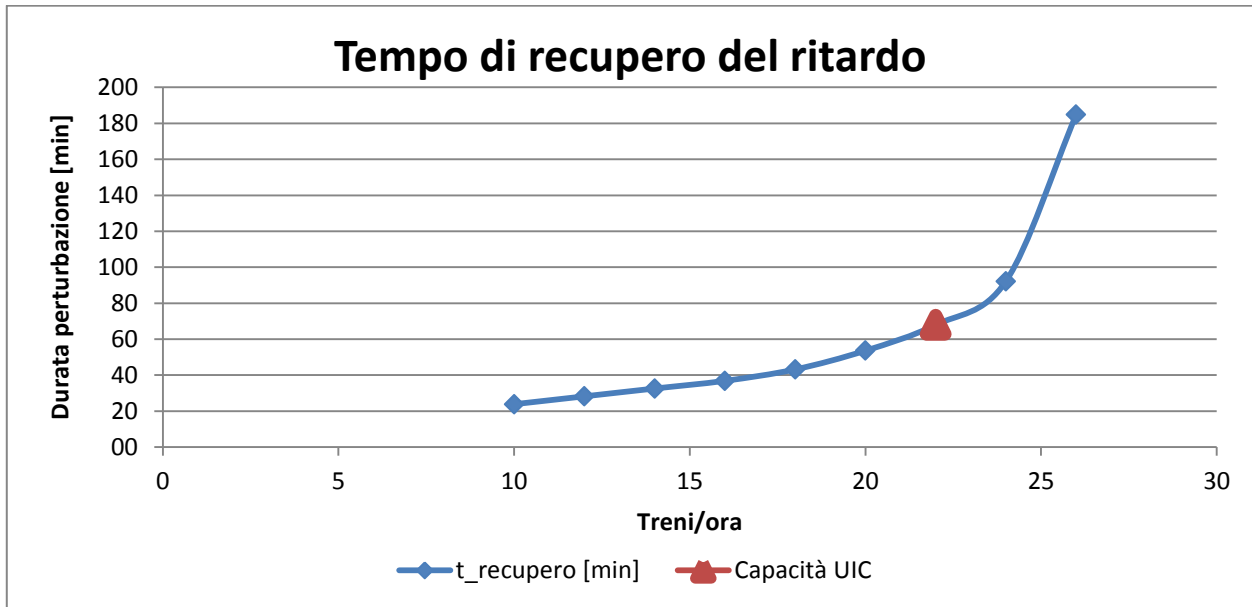


Grafico 8.1.19: Legame tra tempo di recupero della perturbazione e treni/ora – linea suburbana – Blocco Mobile

8.1.3 Confronto

Di seguito si riportano due grafici in cui si osservano assieme le prestazioni offerte dai due sistemi di distanziamento.

Nel Grafico 8.1.20 si compara il numero di treni coinvolti a parità di treni/ora previsti dall'orario.

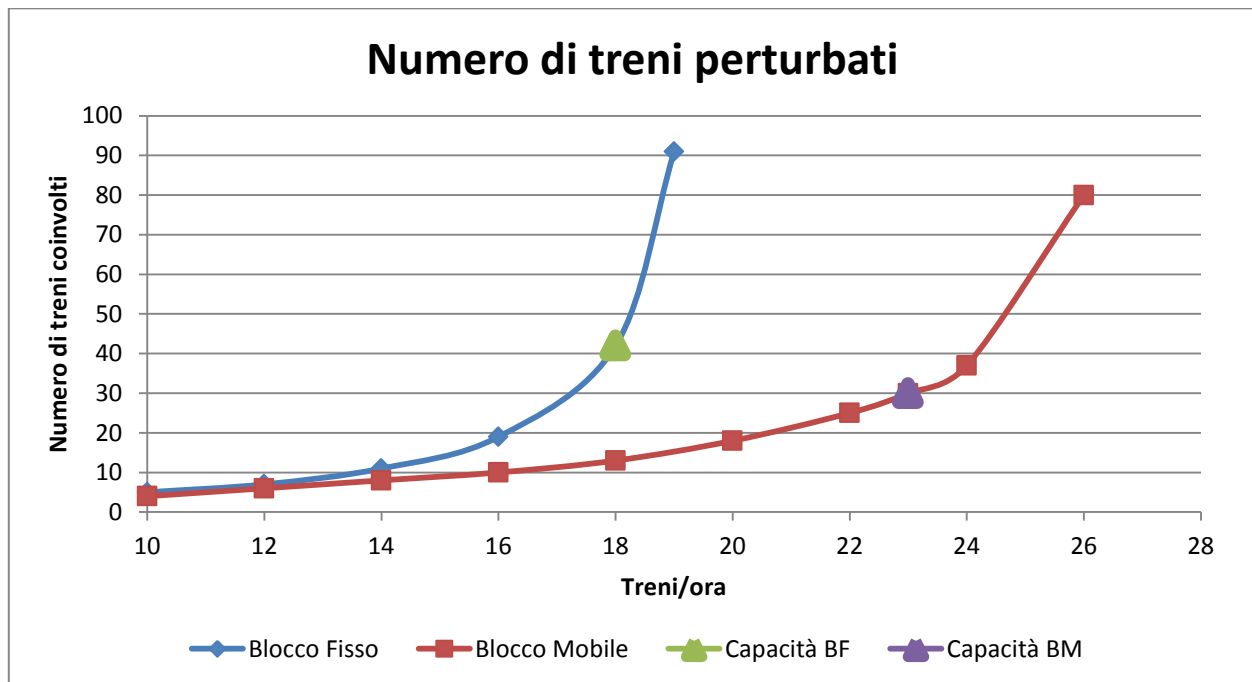


Grafico 8.1.20: Confronto del numero dei treni coinvolti nei due sistemi di distanziamento – linea suburbana

E' evidente che il Blocco Mobile, a fronte dell'elevata capacità che offre, è anche in grado di assorbire meglio le perturbazioni all'orario di servizio, coinvolgendo un minor numero di treni.

Lo stesso si può dire per il tempo di recupero della perturbazione, mostrato nel seguente grafico.

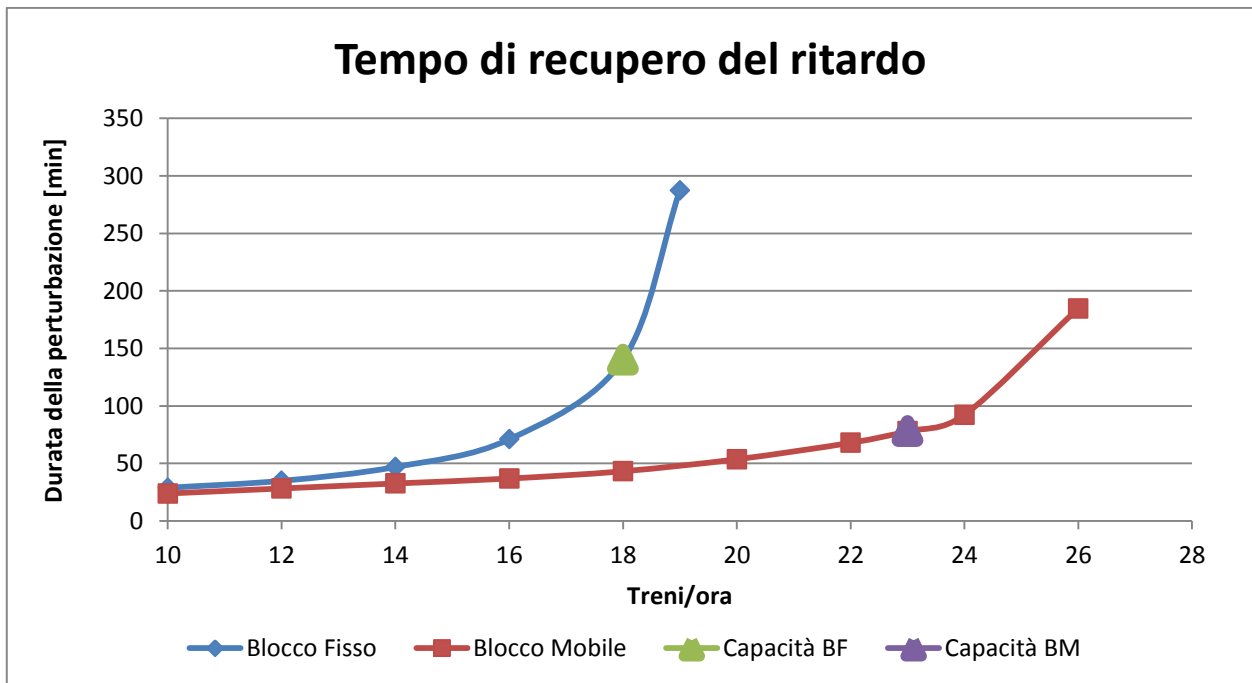


Grafico 8.1.21: Confronto della durata della perturbazione nei due sistemi di distanziamento – linea suburbana

Tuttavia, per un numero di treni non elevato e comunque distante dalla capacità con il Blocco Fisso, l'andamento della perturbazione è simile per entrambi i sistemi. Pertanto il vantaggio di passare da un sistema ad un altro dipende dal grado di saturazione della linea; è per elevata mole di traffico che il distanziamento a Blocco Mobile può fornire un importante contributo allo smaltimento delle perturbazioni.

8.2 Linea ad Alta Velocità

È stato eseguito lo studio di propagazione dei ritardi anche per la linea ad alta velocità, in modo da comparare i due sistemi di distanziamento. Sono stati necessari alcuni tentativi per individuare la sezione critica in cui inserire il ritardo primario. Innanzitutto è indifferente a quale treno applicarlo, dal momento che le tracce si susseguono identicamente. È emerso che i ritardi hanno un maggiore impatto sulla circolazione se si verificano in una zona intermedia di una delle tratte interstazionali. Infatti i treni sono costretti ad effettuare la completa fase di decelerazione dalla

velocità d'orario, a fermarsi e ad accelerare fino alla velocità di regime. Porre invece il ritardo nella zona antecedente una stazione provoca un perditempo inferiore, poiché alla ripartenza il treno effettua soltanto un breve tratto di accelerazione per poi frenare. Lo stesso avviene se il ritardo è seguente ad una stazione; in aggiunta i treni successivi devono soltanto ritardare la partenza dalla stazione ma, a parte ciò, non subiscono ulteriori perditempo perché possono beneficiare dei binari liberi in stazione.

8.2.1 Blocco Fisso

Il ritardo è stato posto in una zona intermedia della prima tratta interstazionale, alla progressiva 90'500 m, all'interno della 50° sezione di blocco. Negli Allegati B.5, B.6, B.7 e B.8 si può vedere come si modificano le tracce dei treni seguenti. Si possono riconoscere le caratteristiche descritte da Accattatis: le due linee di propagazione sono ben definite per tutti i treni costretti a fermarsi per il ritardo del primo treno, mentre per i successivi, per i quali vi è solo una diminuzione di velocità, le linee di propagazione non sono più rettilinee e si incurvano. Questo in quanto si sono considerate variazioni graduali di velocità di marcia.

Nei grafici seguenti si riportano in ascissa il treno con ritardo primario e i treni perturbati in ordine di apparizione sulla linea ed in ordinata il ritardo con cui si presentano in linea e quello con cui giungono al termine. Nel presente paragrafo è stato utilizzato il codice di calcolo basato sull'algoritmo di Figura 6.5.1.

Nel caso di 8 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 2 e la perturbazione si arresta dopo circa 22 minuti.

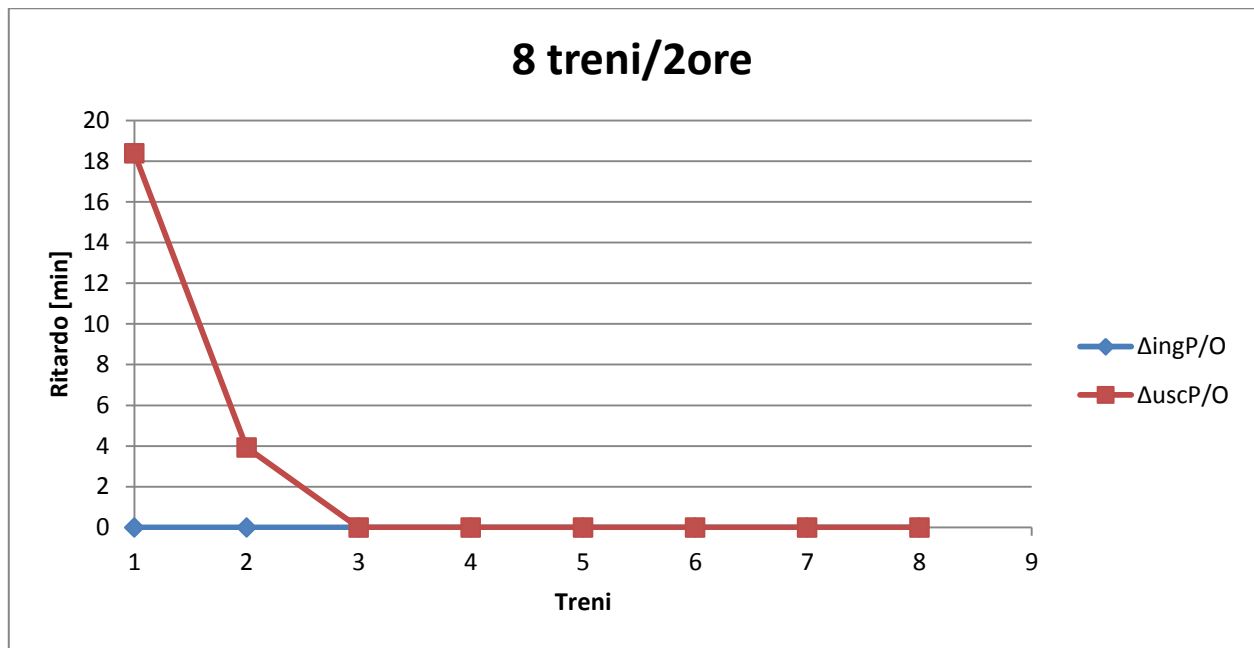


Grafico 8.2.1: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 8 tr/2h

Nel caso di 12 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 27 minuti.

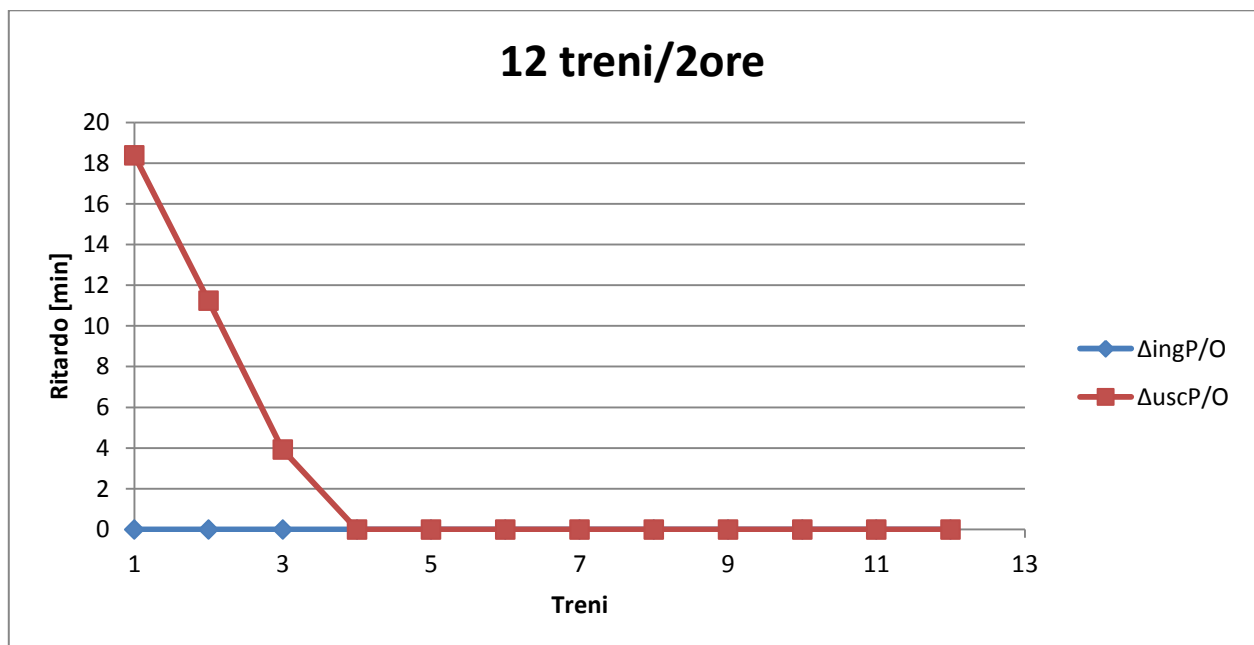


Grafico 8.2.2: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 12 tr/2h

Nel caso di 16 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 4 e la perturbazione si arresta dopo circa 30 minuti.

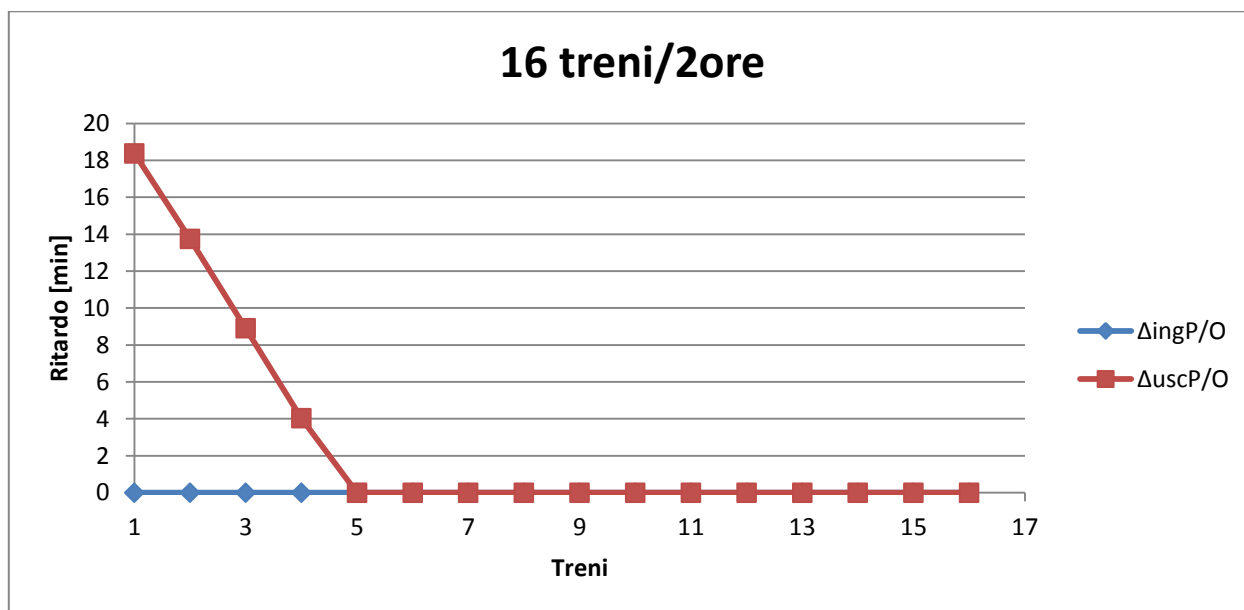


Grafico 8.2.3: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 16 tr/2h

Nel caso di 20 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 6 e la perturbazione si arresta dopo circa 35 minuti. Si può intuire che la crescita di treni coinvolti e del tempo di recupero inizi a farsi più che lineare.

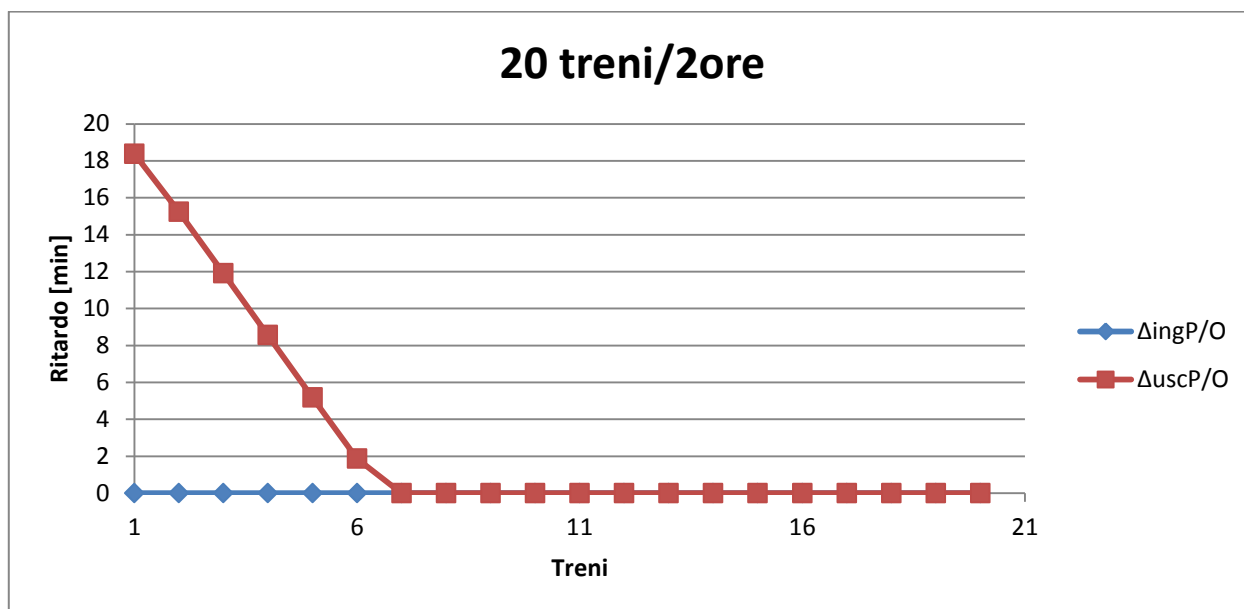


Grafico 8.2.4: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 20 tr/2h

Nel caso di 26 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 10 e la perturbazione si arresta dopo circa 45 minuti.

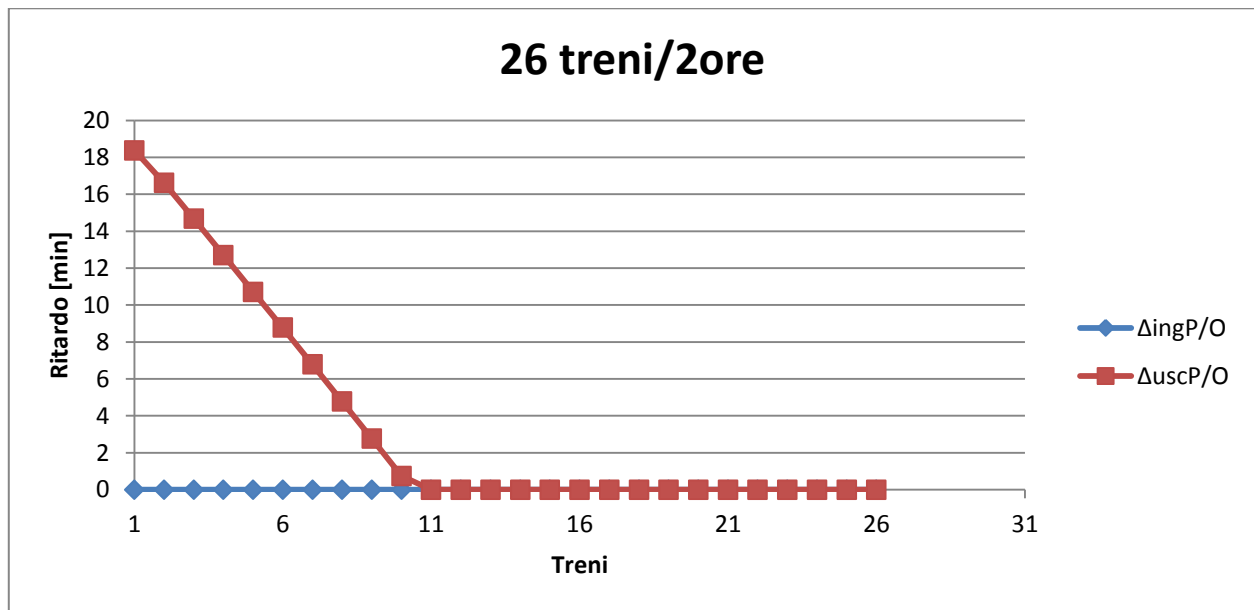


Grafico 8.2.5: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 26 tr/2h

Nel caso di 30 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 14 e la perturbazione si arresta dopo circa 55 minuti. Sebbene si sia ormai superato il valore di capacità previsto dal metodo UIC CODE 406, il numero di treni coinvolti rimane comunque al di sotto del numero di treni/ora, questo risultato verrà in seguito discusso.

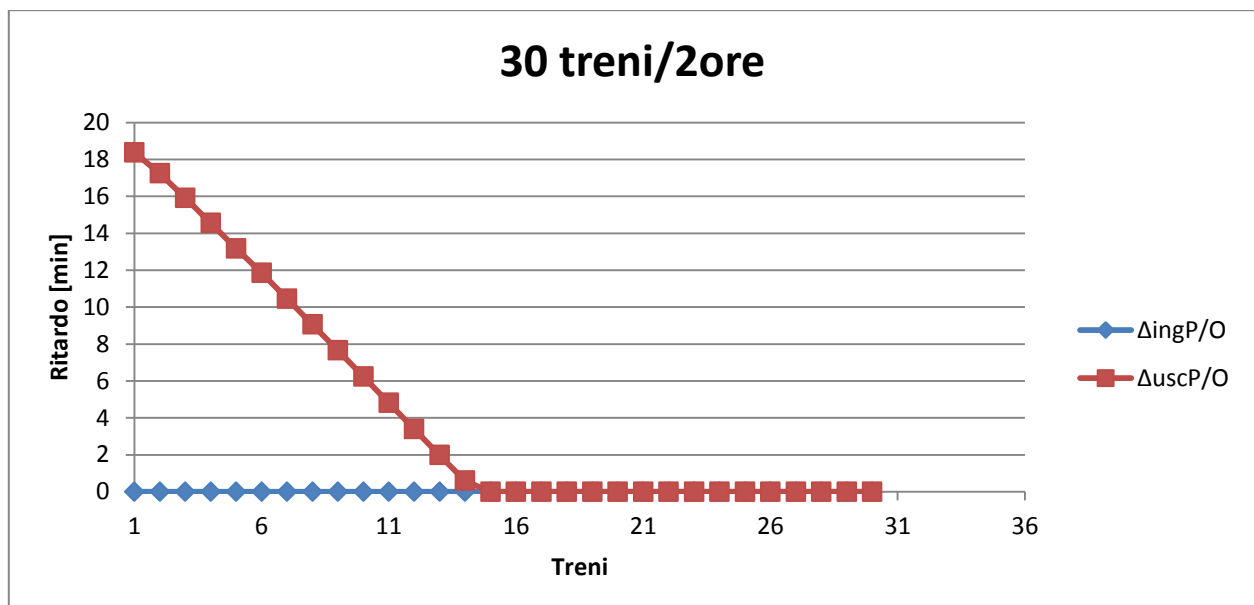


Grafico 8.2.6: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 30 tr/2h

Nel caso di 34 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 21 e la perturbazione si arresta dopo circa 1 ora e 13 minuti.

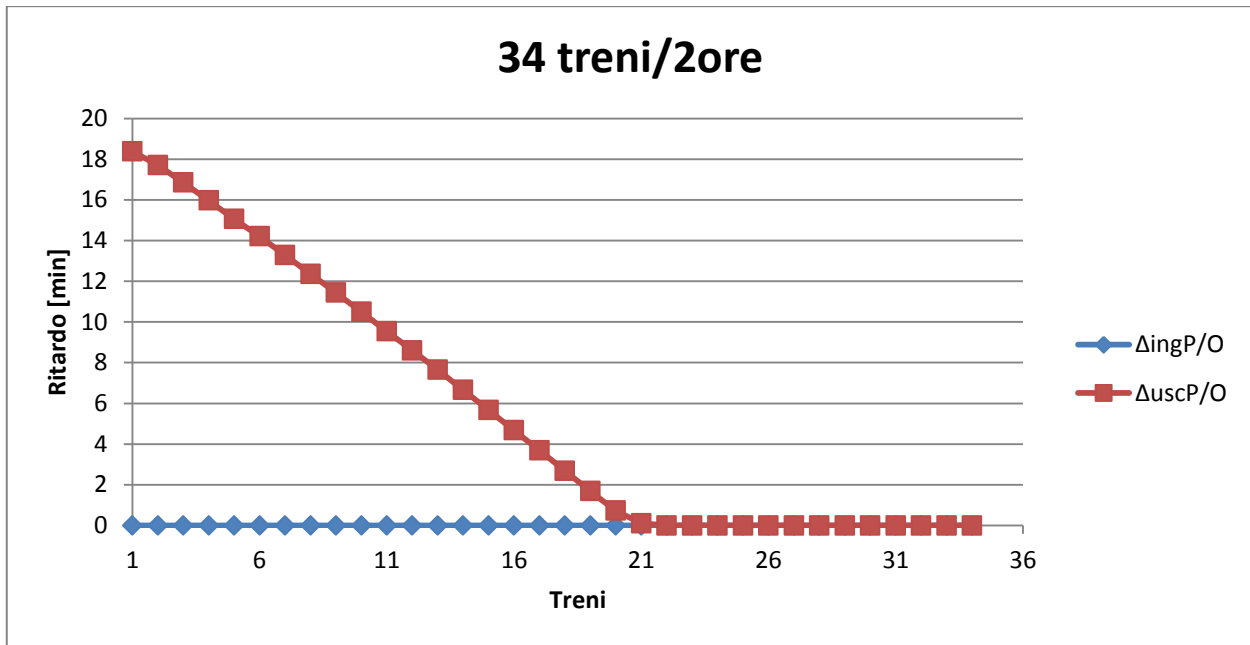


Grafico 8.2.7: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 34 tr/2h

Per 36 treni/2ore accade che si raggiunge la capacità teorica della linea. Vi è la totale occupazione dell'infrastruttura nell'intervallo di tempo considerato; non è possibile prevedere 38 treni/ora perché è stata superata la capacità teorica. Fino a 27 treni/2ore l'occupazione di infrastruttura era inferiore al 75%, aumentando i treni via via fino a 38 sono state occupate e infine esaurite le riserve di margini di tempo. I treni arrivano tutti in ritardo, con un ritardo residuo identico, mentre in partenza ancora non ci sono problemi poiché l'aumento di treni mette in crisi l'occupazione della tratta di frenatura ma non ancora la partenza. Tutti i treni giungono in ritardo, ma quelli coinvolti dalla perturbazione sono solo quelli con ritardo superiore a quello residuo. Nel caso di 38 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 32 e la perturbazione si arresta dopo circa 1 ora e 38 minuti.

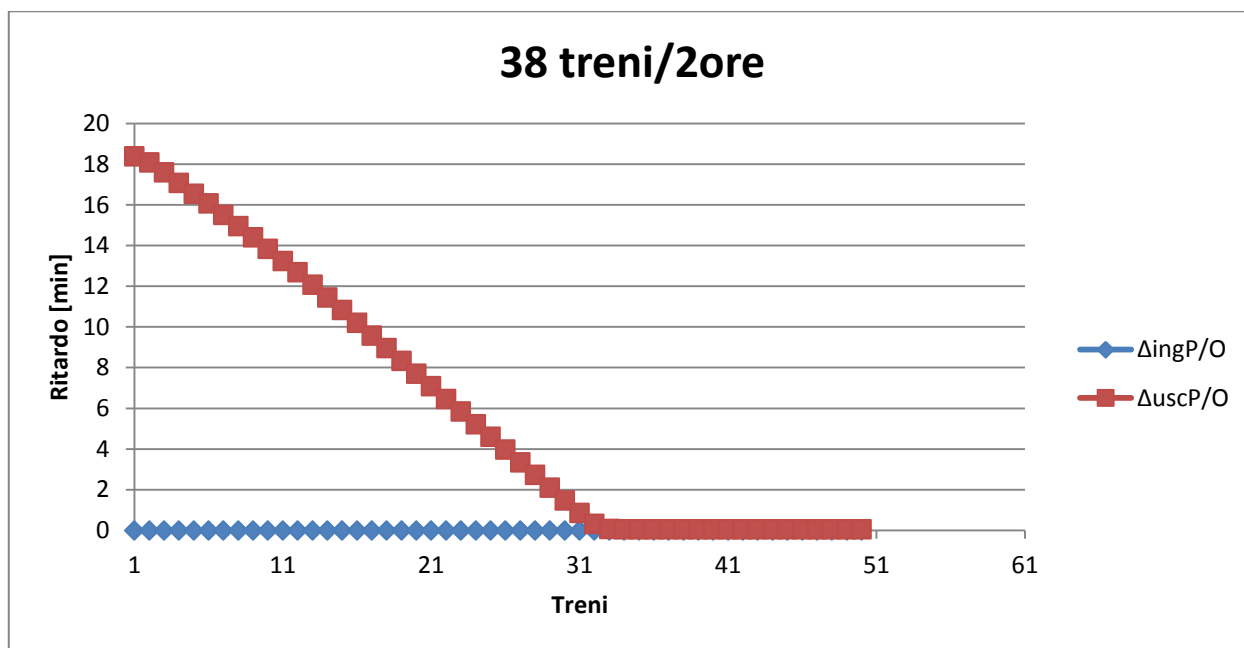


Grafico 8.2.8: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 38 tr/2h

Nel caso di 42 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 60 e la perturbazione si arresta dopo circa 1 ora e 20 minuti. Non si procede ulteriormente poiché si è arrivati finalmente ad un punto in cui il numero di treni coinvolti aumenta esponenzialmente.

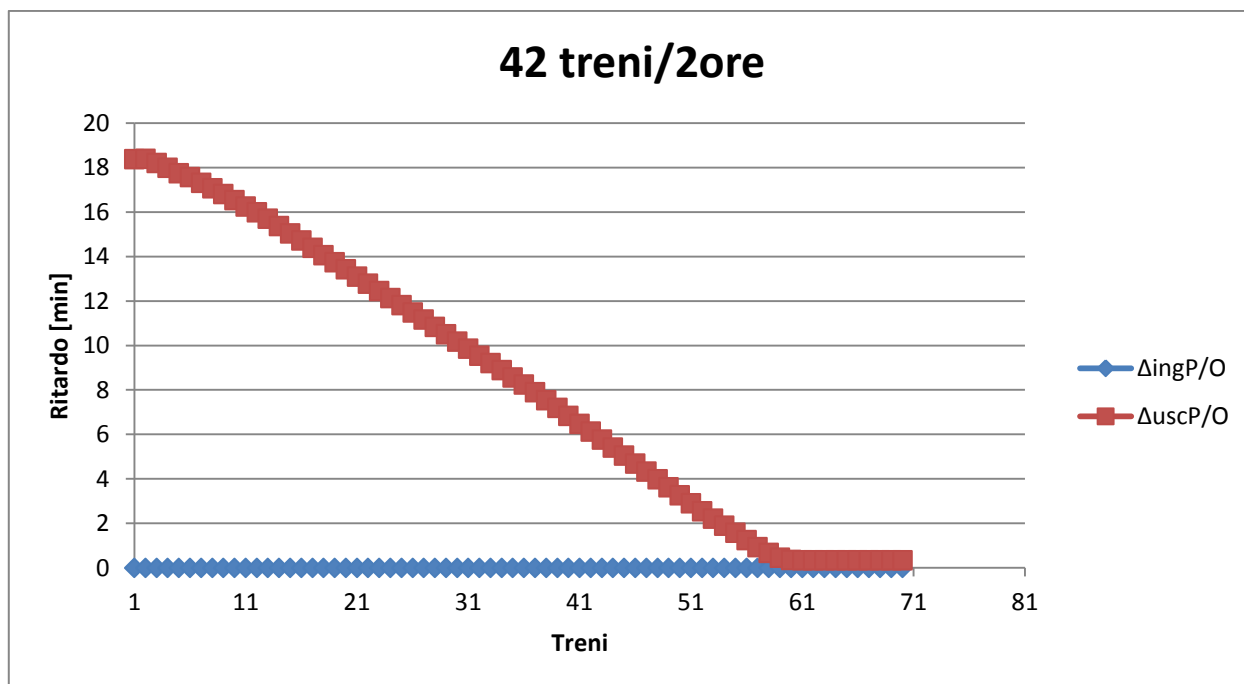


Grafico 8.2.9: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Fisso – 42 tr/2h

8.2.1.1 Sintesi dei risultati

È possibile osservare l'andamento dei treni perturbati in funzione del numero di treni/ora previsti dall'orario. La situazione è stabile finché il numero di treni coinvolti è inferiore a quello di treni/ora, dopodiché il numero di treni perturbati cresce esponenzialmente.

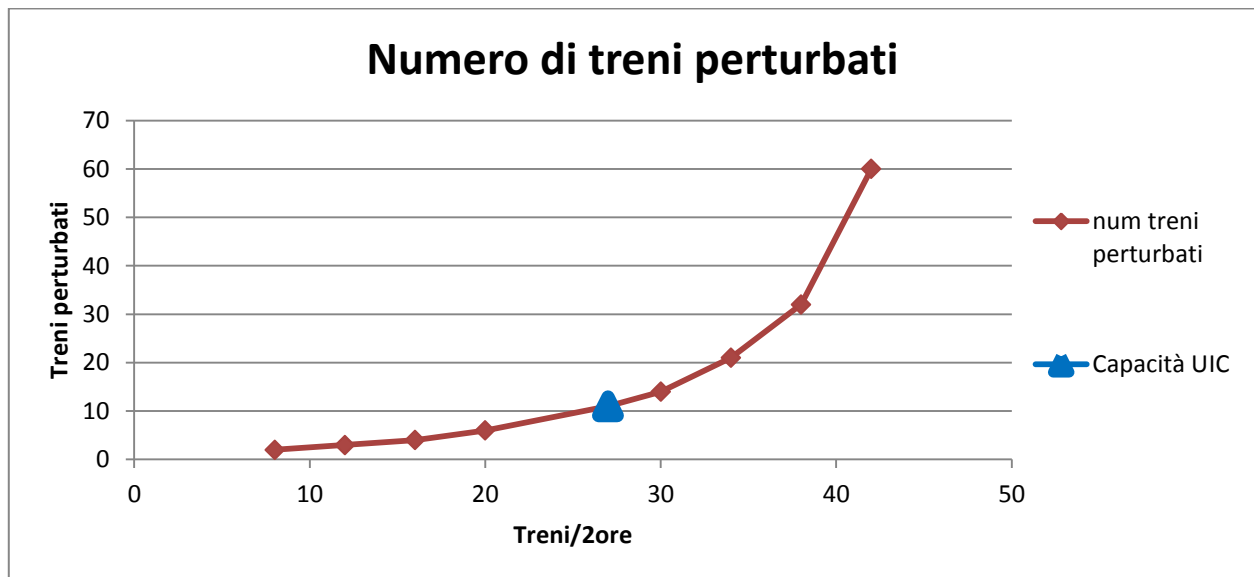


Grafico 8.2.10: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea AV – Blocco Fisso

L'andamento del tempo di durata della perturbazione è raffigurato nel seguente grafico.

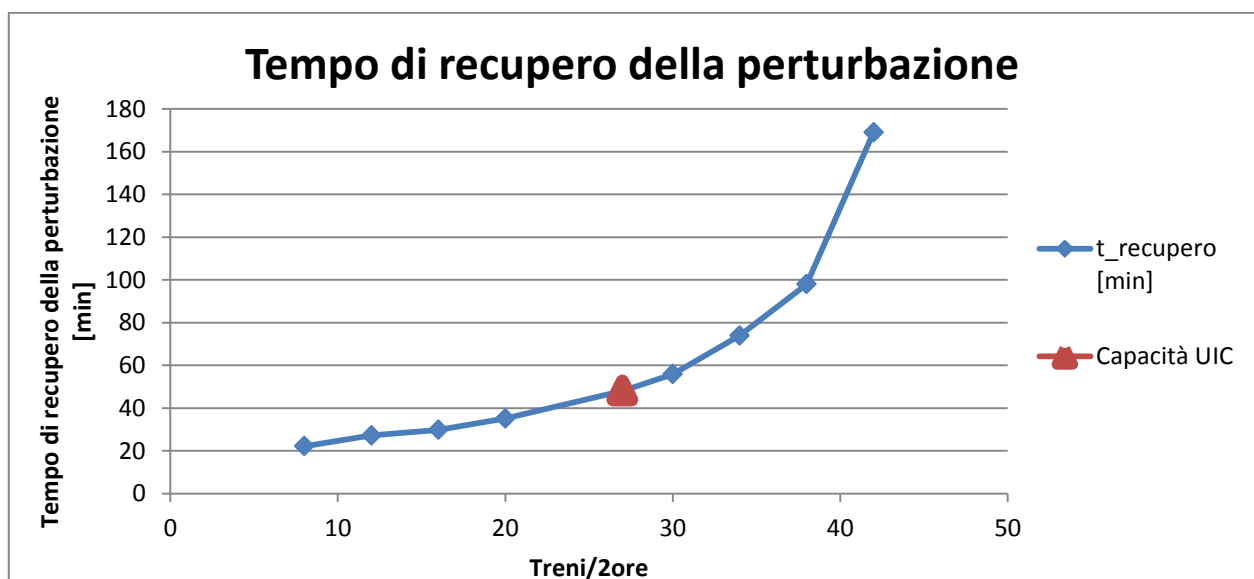


Grafico 8.2.11: Legame tra durata della perturbazione e treni/ora – linea AV – Blocco Fisso

Le osservazioni da fare sono le seguenti:

- la propagazione esponenziale della perturbazione avviene per un traffico di gran lunga maggiore della capacità dell'infrastruttura;
- oltre un certo numero di treni/ora tutti i treni subiscono ritardo;

La prima questione è di un certo interesse sullo studio della capacità. Si può essere portati a pensare che lo studio di capacità abbia fornito dei risultati in difetto, e che la linea abbia una capacità superiore. Questo è in parte vero solo in parte. I treni adattano la propria marcia in virtù delle sezioni di blocco a loro disposizione, a seguito di una perturbazione devono rallentare e potrà esserci una più alta densità di convogli in linea, esattamente come era stato spiegato riguardo al legame tra velocità massima e capacità. Pur essendo il distanziamento a Blocco Fisso, l'utilizzo di limiti di velocità diversi al variare dello spazio libero avvicina molto tale distanziamento a quello a Blocco Mobile, in cui la velocità e la distanza libera sono legate in modo continuo lungo tutto il tracciato.

Per la seconda questione, si è già visto che quando il numero di treni occupa uno spazio superiore all'intervallo di tempo, allora i treni accusano tutti quanti un ritardo residuo. Il ritardo primario si assorbe però entro un tempo finito e quindi non sono da annoverare nei treni perturbati quelli aventi solo ritardo residuo. Questo ritardo dipende solo dal numero di treni/ora e non dal ritardo primario.

8.2.2 Blocco Mobile

La sezione più critica in questo tipo di distanziamento è ancora un punto facente parte dalla tratta normalmente percorsa a regime. Si è deciso di fissare ancora il ritardo primario ad una progressiva di 90'500 metri. Nel presente paragrafo è stato utilizzato il codice di calcolo basato sull'algoritmo di Figura 6.5.2.

Nel caso di 8 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 2 e la perturbazione si arresta dopo circa 20 minuti.

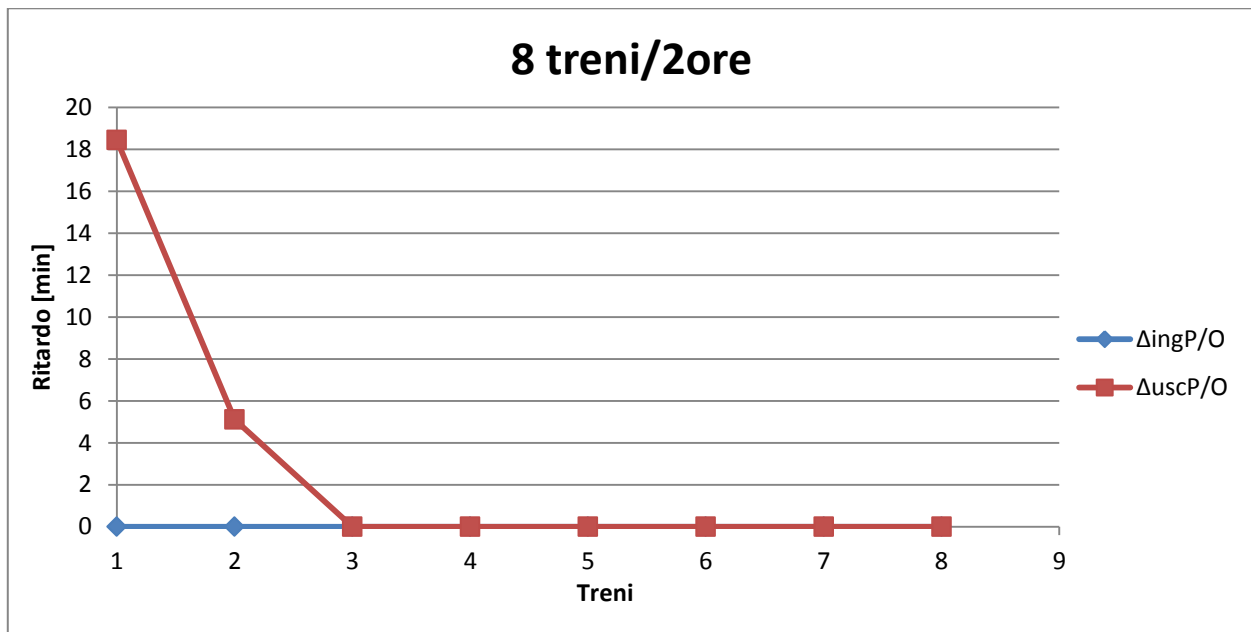


Grafico 8.2.12: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 8 tr/2h

Nel caso di 16 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 4 e la perturbazione si arresta dopo circa 23 minuti.

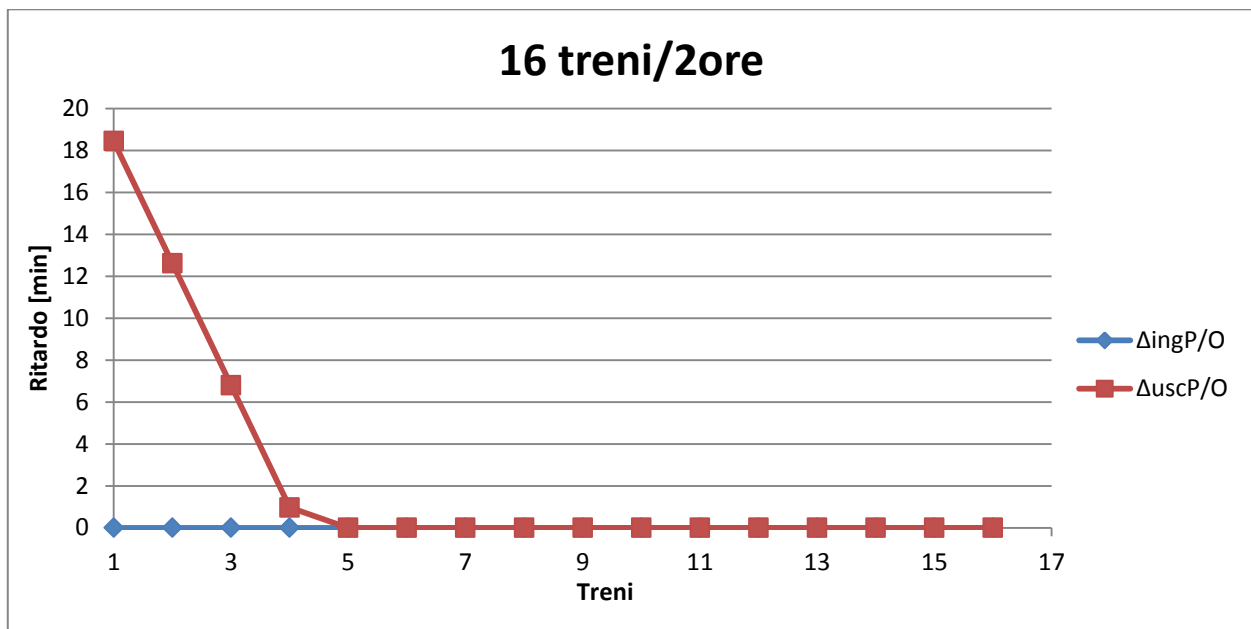


Grafico 8.2.13: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 16 tr/2h

Nel caso di 24 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 6 e la perturbazione si arresta dopo circa 27 minuti.

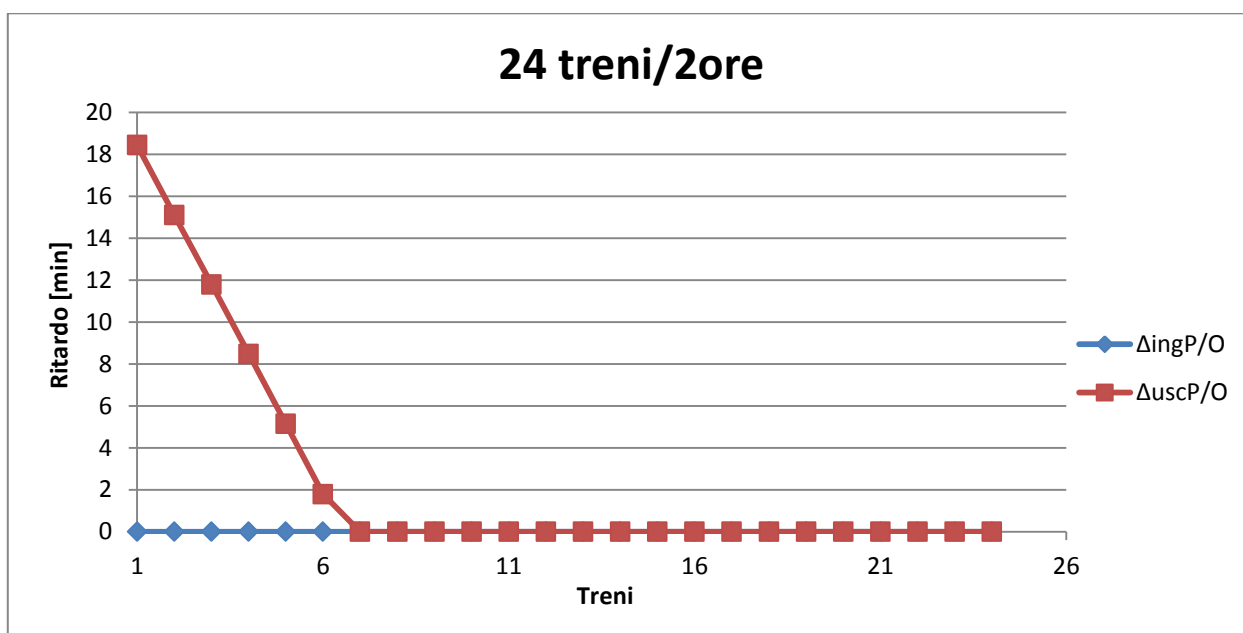


Grafico 8.2.14: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 24 tr/2h

Nel caso di 32 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 9 e la perturbazione si arresta dopo circa 31 minuti.

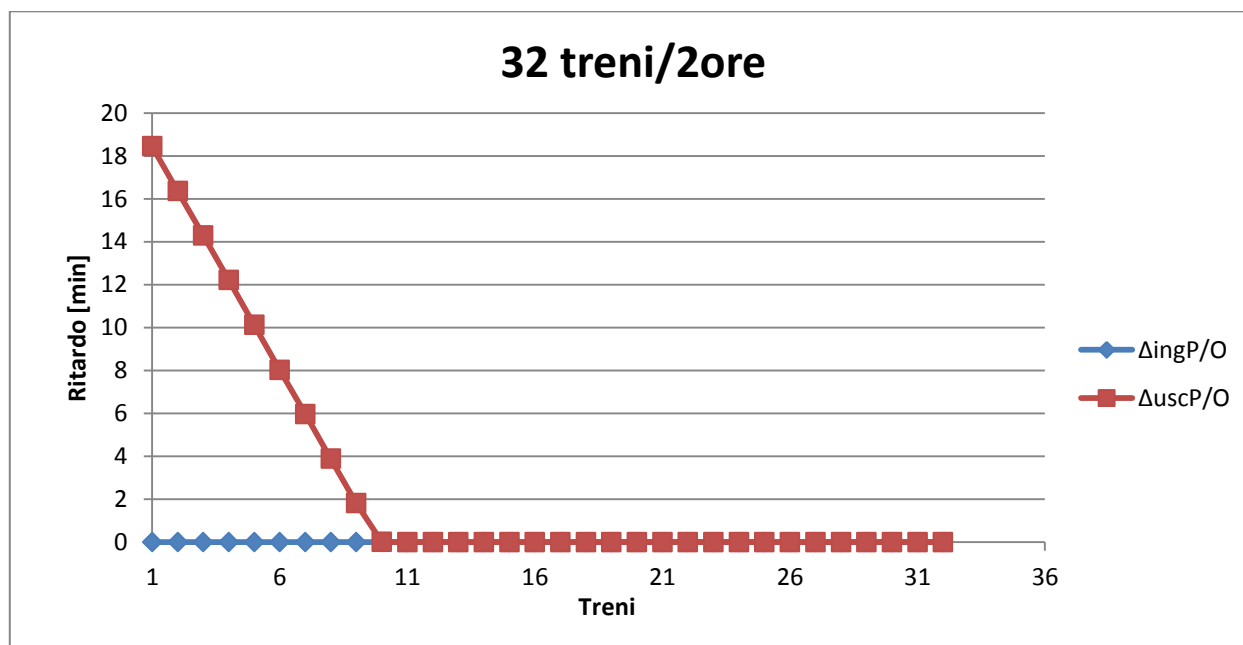


Grafico 8.2.15: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 32 tr/2h

Nel caso di 40 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 14 e la perturbazione si arresta dopo circa 40 minuti.

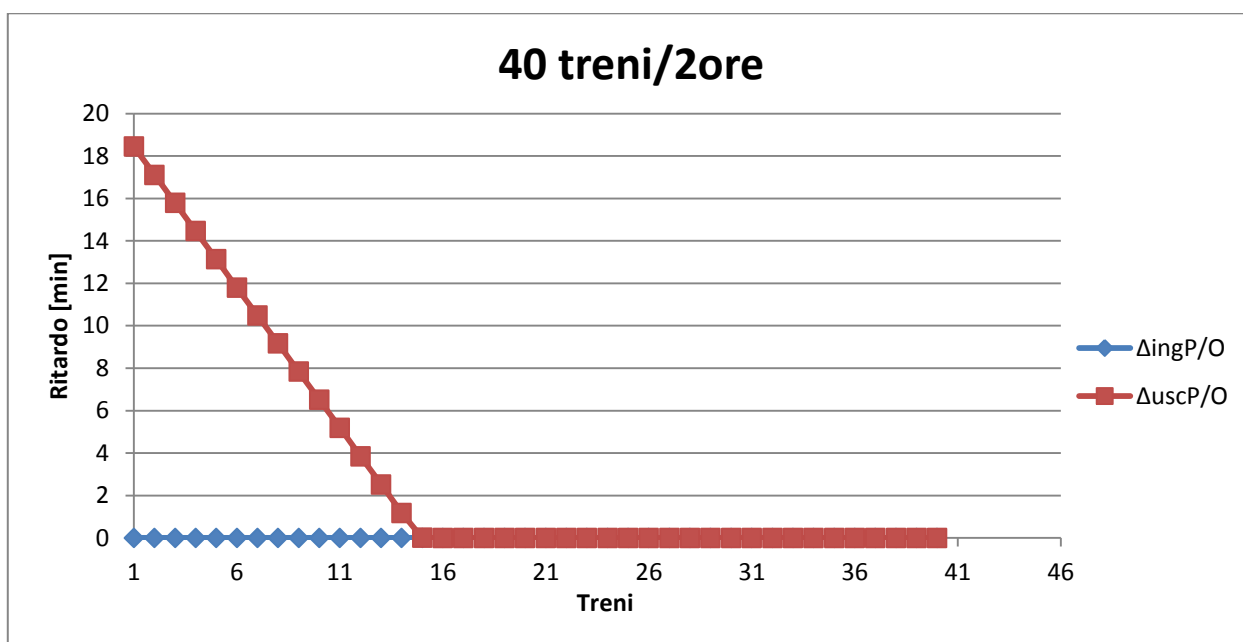


Grafico 8.2.16: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 40 tr/2h

Nel caso di 44 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 18 e la perturbazione si arresta dopo circa 47 minuti.

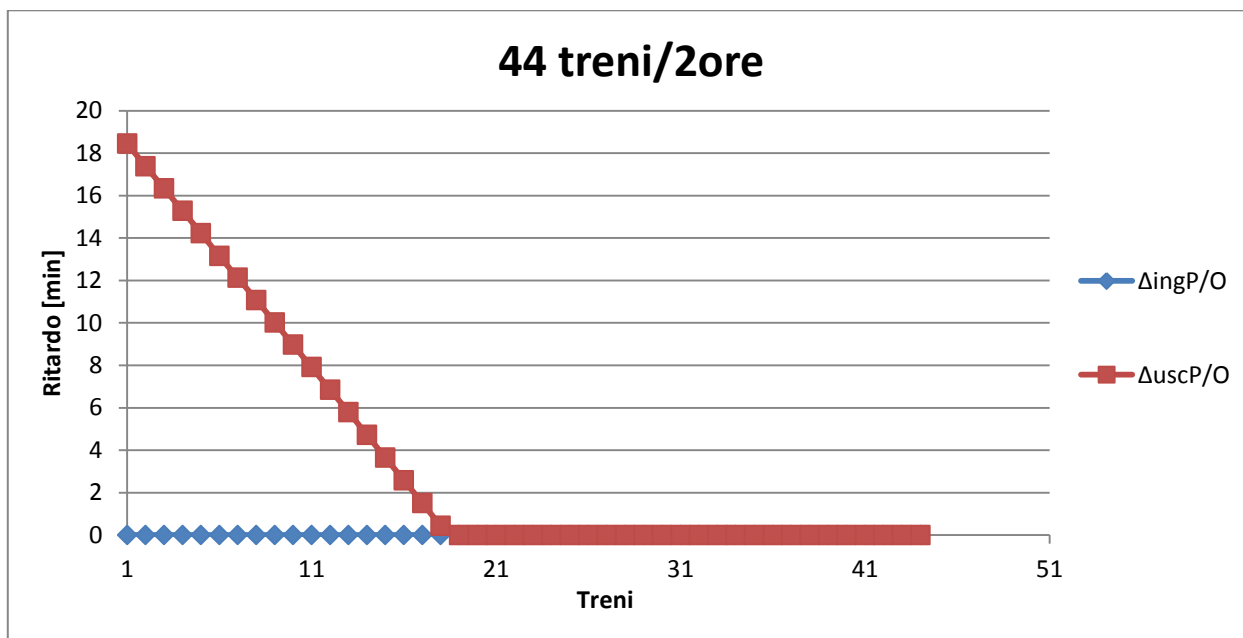


Grafico 8.2.17: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 44 tr/2h

Nel caso di 48 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 22 e la perturbazione si arresta dopo circa 53 minuti.

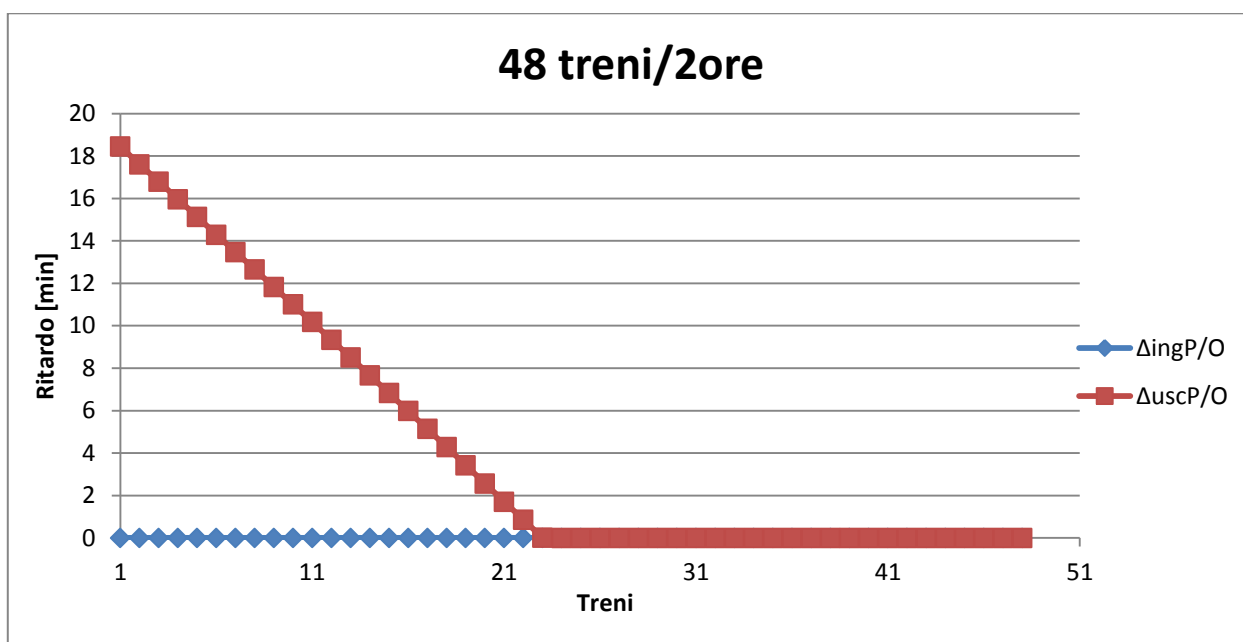


Grafico 8.2.18: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 48 tr/2h

Nel caso di 52 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 29 e la perturbazione si arresta dopo circa 1 ora e 5 minuti.

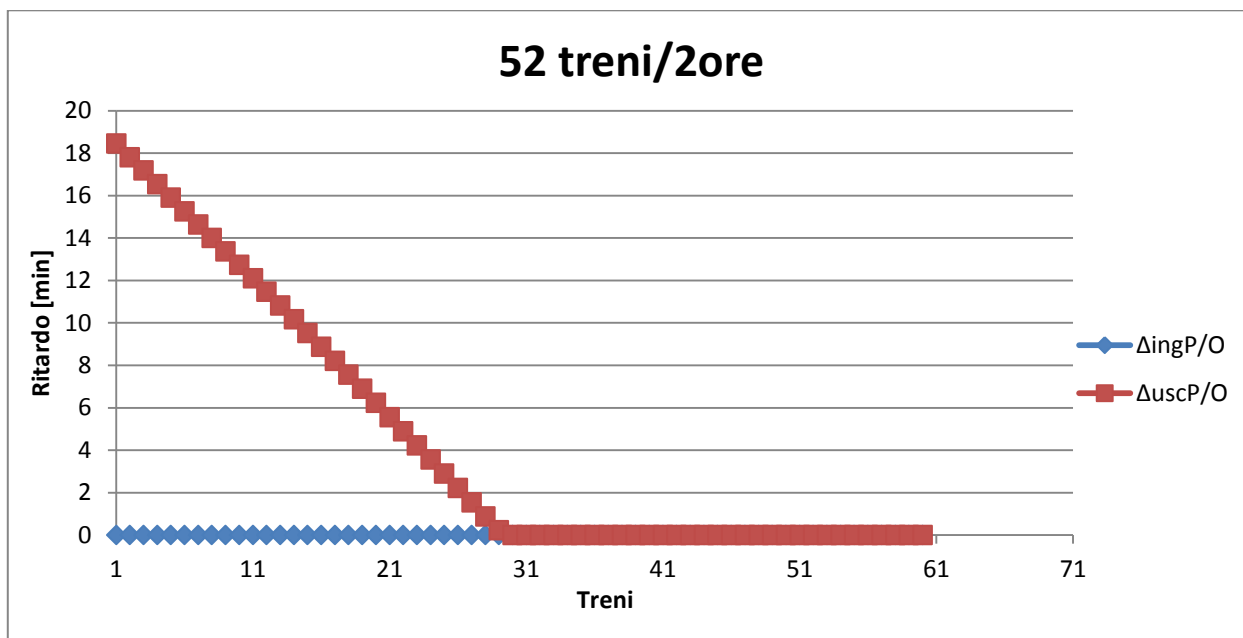


Grafico 8.2.19: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 52 tr/2h

Nel caso di 56 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 38 e la perturbazione si arresta dopo circa 1 ora e 19 minuti.

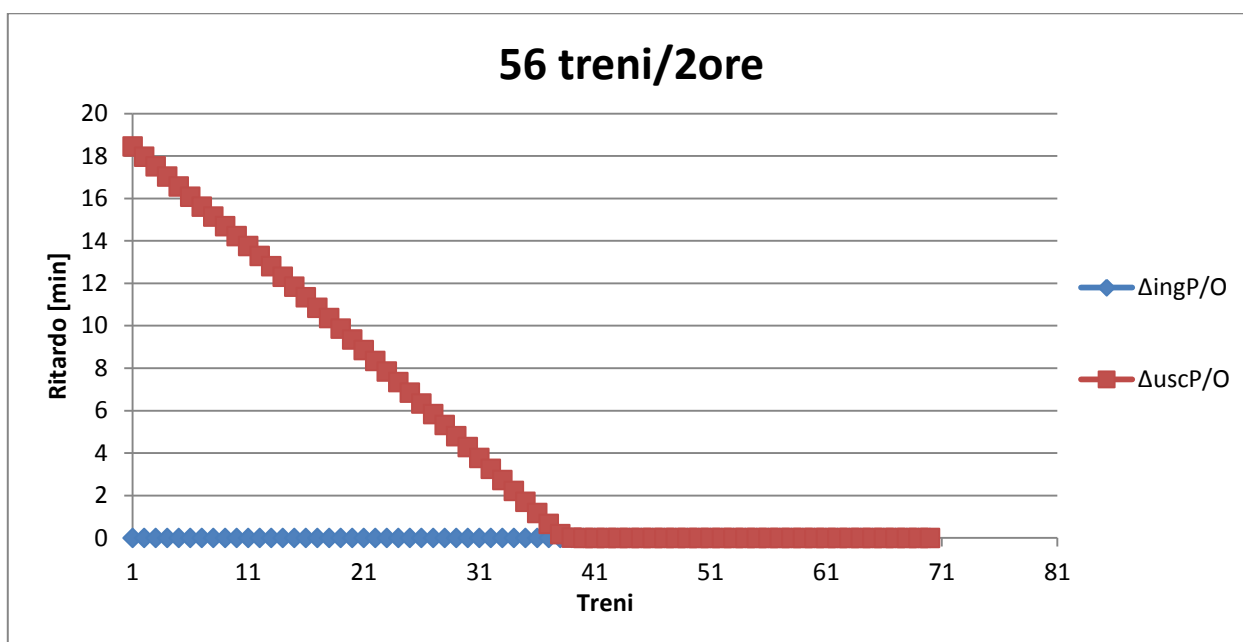


Grafico 8.2.20: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 56 tr/2h

Nel caso di 60 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 51 e la perturbazione si arresta dopo circa 1 ora e 40 minuti.

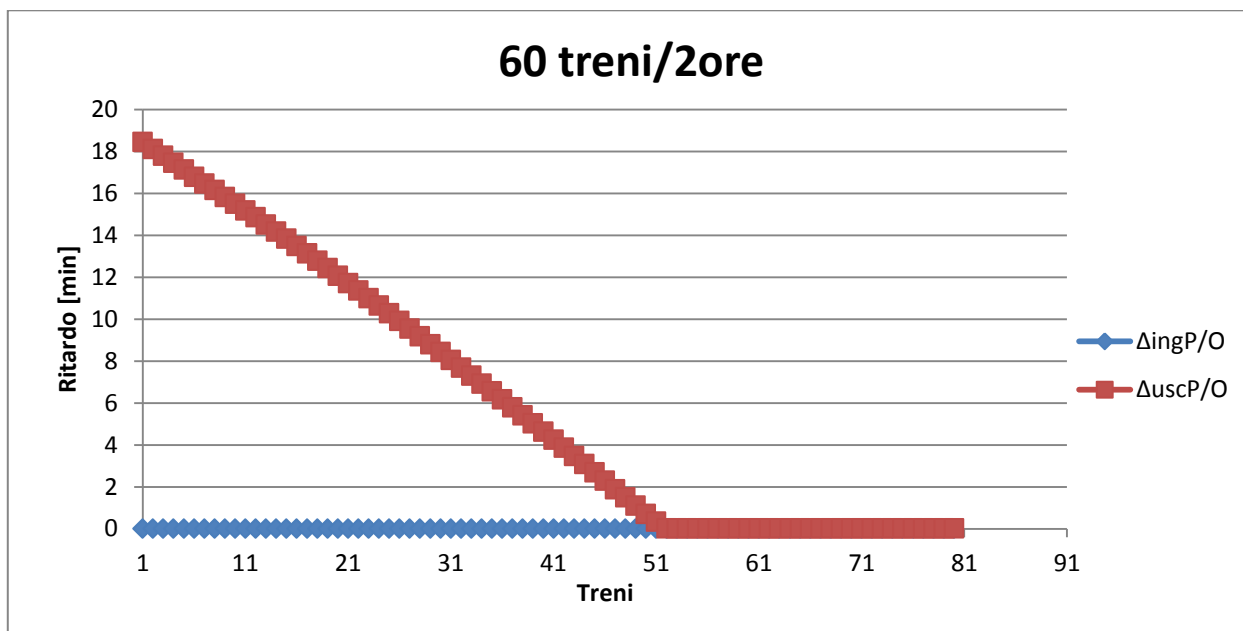


Grafico 8.2.21: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 60 tr/2h

Nel caso di 64 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 73 e la perturbazione si arresta dopo circa 2 ore e 15 minuti.

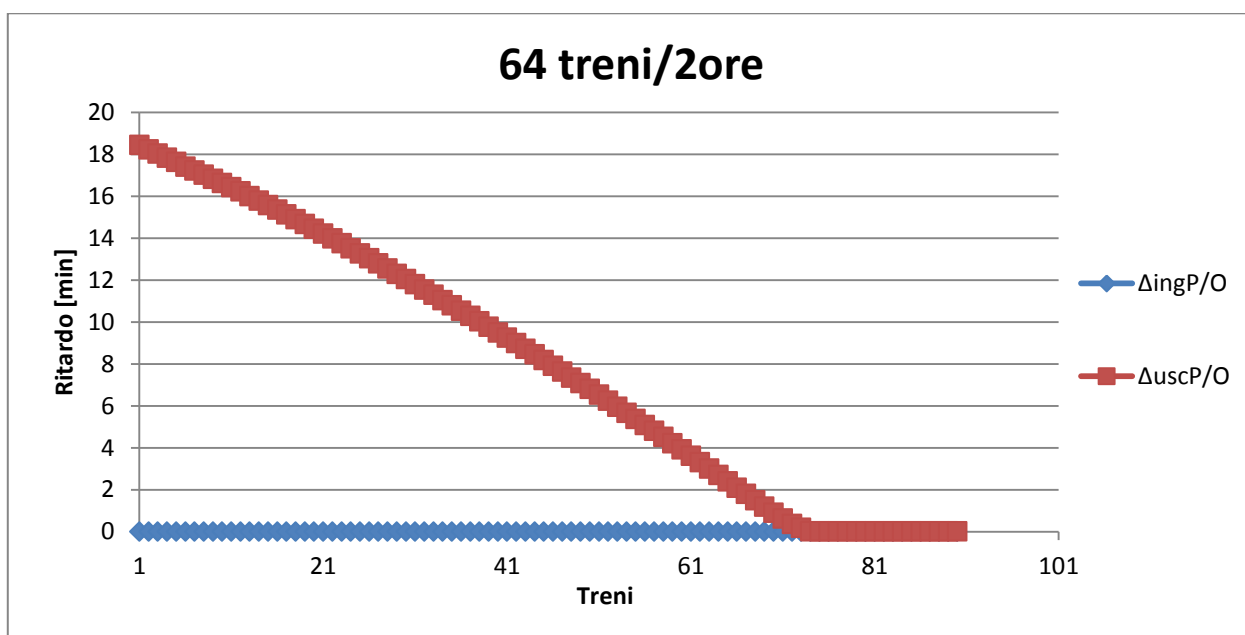


Grafico 8.2.22: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 64 tr/2h

Nel caso di 68 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 110 e la perturbazione si arresta dopo circa 3 ore e 12 minuti.

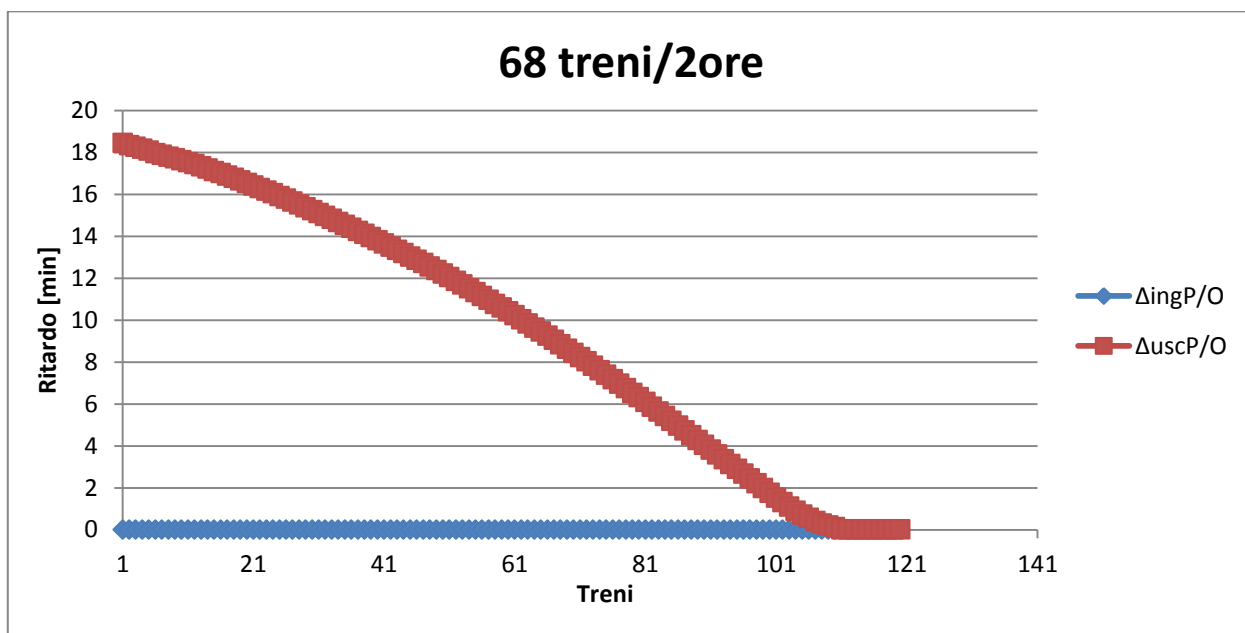


Grafico 8.2.23: Propagazione dei ritardi – linea AV – Blocco Mobile – 68 tr/2h

8.2.2.1 Sintesi dei risultati

È possibile osservare l'andamento dei treni perturbati in funzione del numero di treni/ora previsti dall'orario. La situazione è stabile finché il numero di treni coinvolti è inferiore a quello di treni/ora, dopodiché i treni perturbati aumentano esponenzialmente. Ciò avviene per circa 60 treni/2ore, ovvero per un traffico sensibilmente superiore alla capacità pratica della linea.

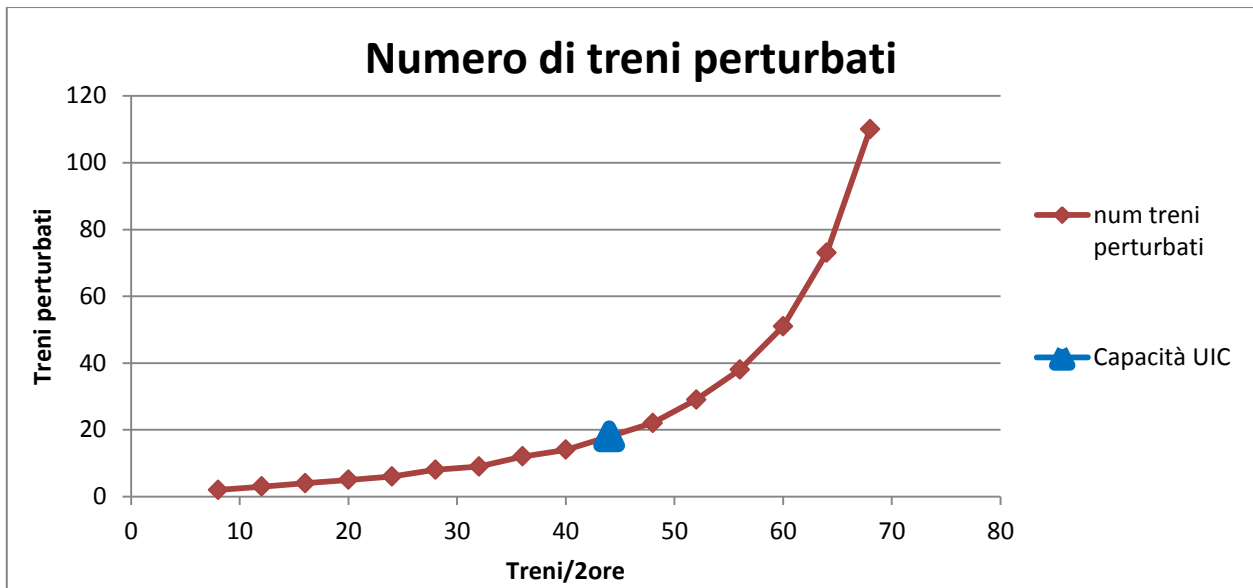


Grafico 8.2.24: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea AV – Blocco Mobile

Il grafico riguardante i tempi di durata della perturbazione è il seguente.

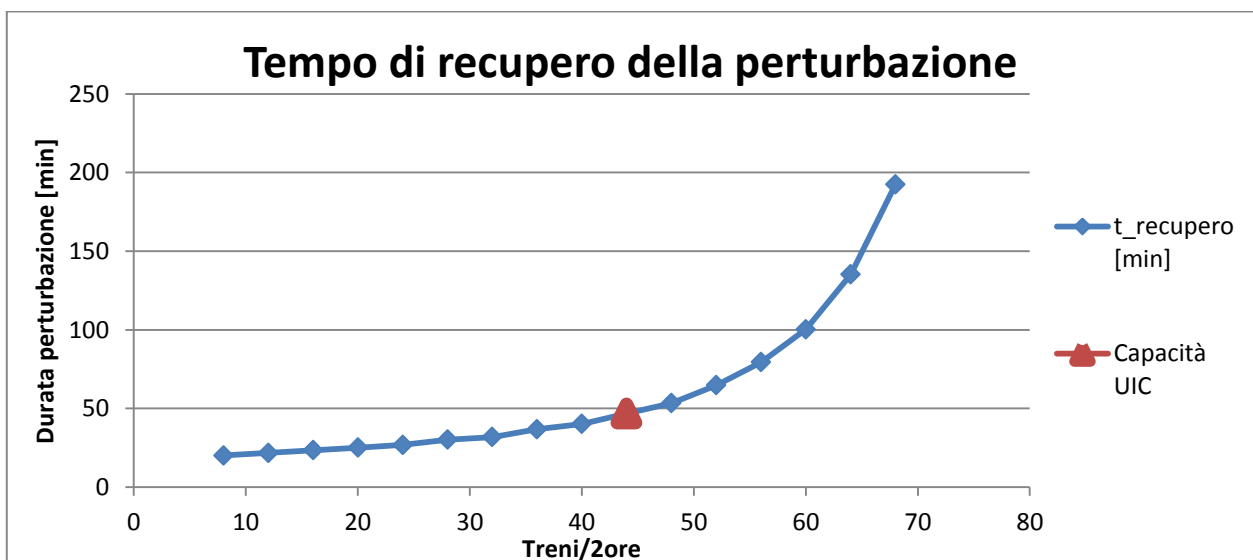


Grafico 8.2.25: Legame tra durata della perturbazione e treni/ora – linea AV – Blocco Mobile

Fino a circa 60 treni/2ore la situazione è piuttosto stabile, nonostante la capacità calcolata sia di 44 treni/ora. Questo perché la capacità teorica è di 60 treni.

8.2.3 Confronto

Si mettono a confronto le due situazioni, il grafico seguente raffigura il numero di treni coinvolti nei due sistemi di distanziamento in funzione del numero di treni/ora.

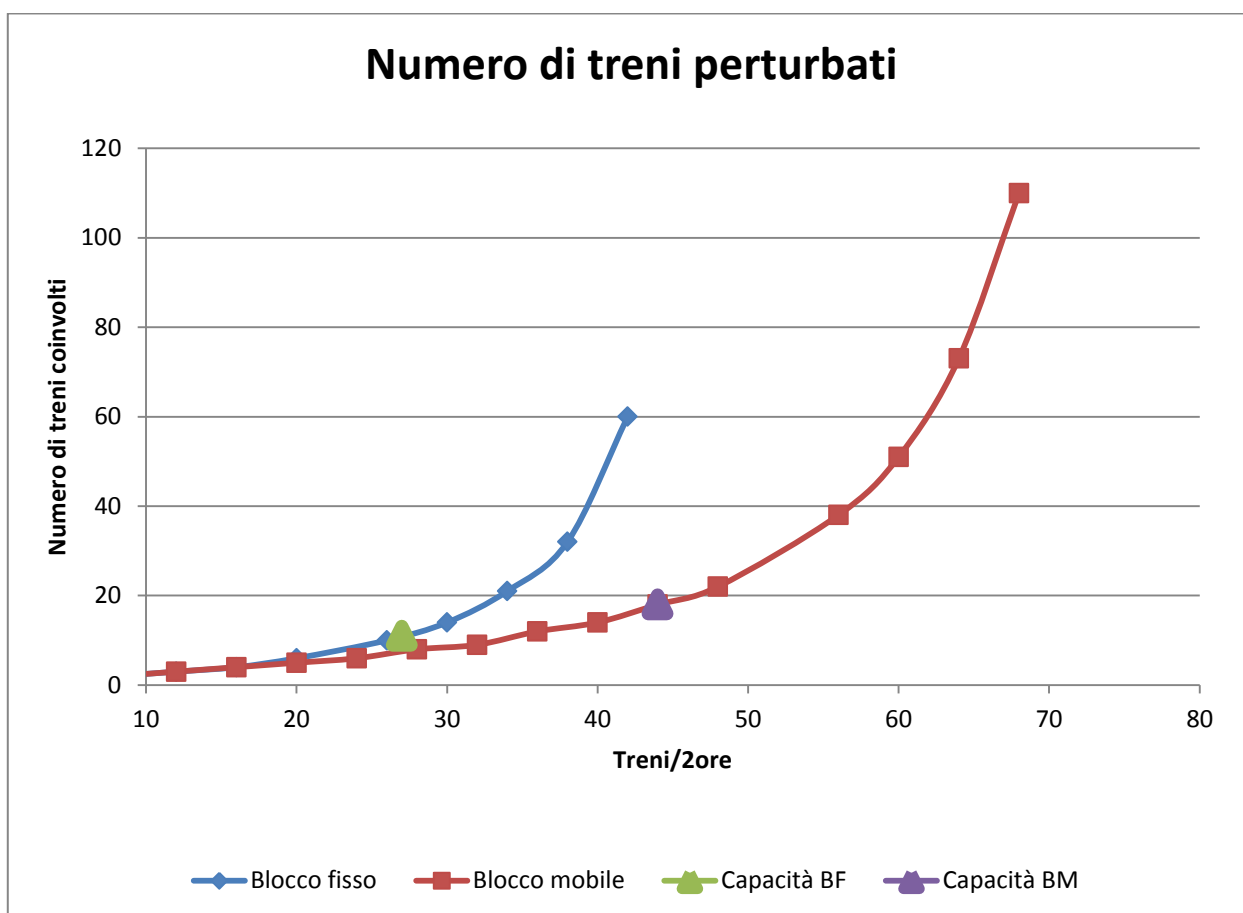


Grafico 8.2.26: Confronto del numero dei treni coinvolti nei due sistemi di distanziamento – linea AV

La stessa cosa per quanto riguarda il tempo di durata del disturbo.

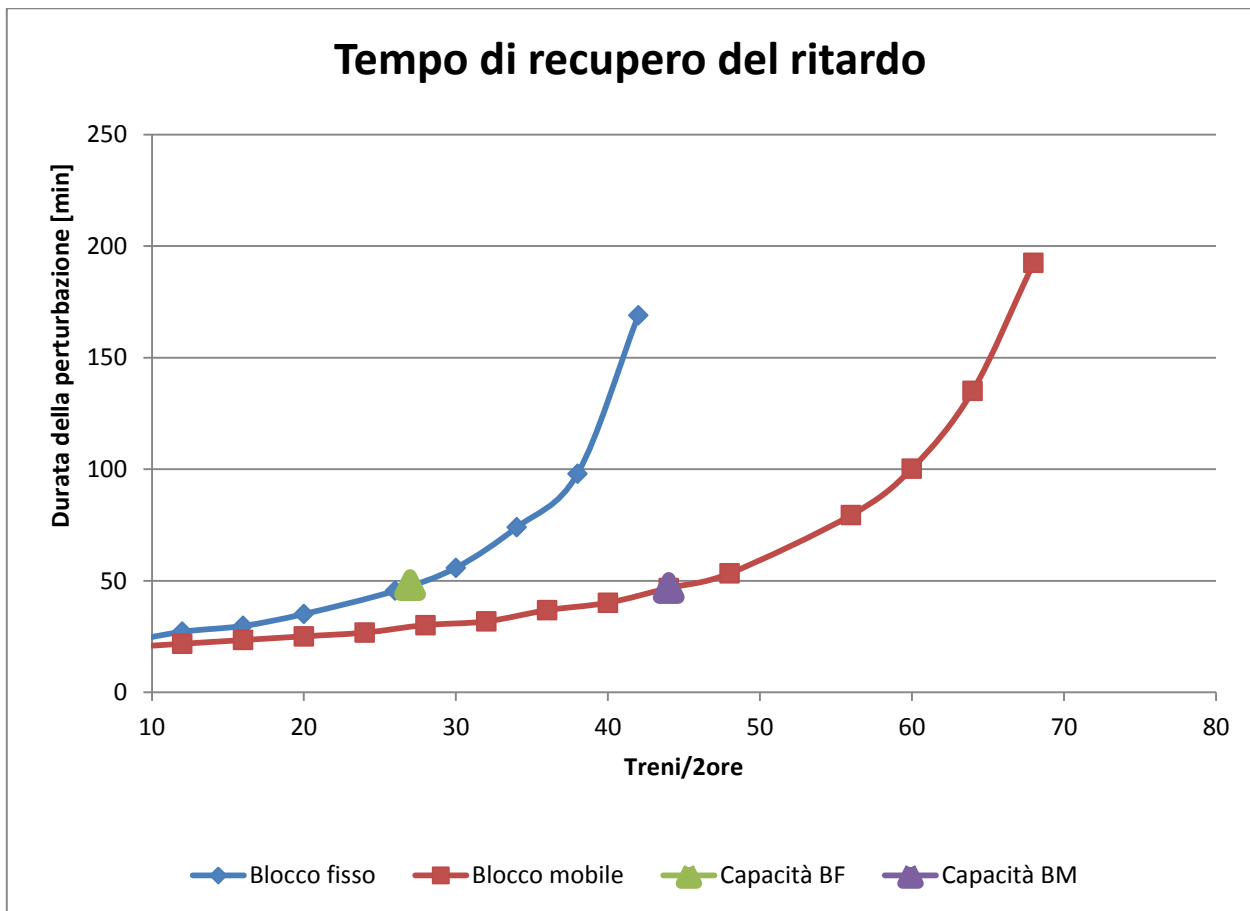


Grafico 8.2.27: Confronto della durata della perturbazione nei due sistemi di distanziamento – linea AV

Lo studio dimostra che, per un traffico inferiore alla capacità del distanziamento a Blocco Fisso, la risposta dei due sistemi si equivale sostanzialmente, in particolar modo nel numero di treni coinvolti. Pertanto la scelta di regolare il distanziamento con il Blocco Mobile non porta a grandi vantaggi su linee che attualmente non sono saturate. Solitamente le più importanti linee ad alta velocità non sono prossime al limite di capacità, questo perché la domanda di trasporto non è elevata come nel traffico pendolare. Le linee ad alta velocità effettuano collegamenti di lungo raggio, in competizione con il trasporto aereo, e si rivolgono ad una clientela più o meno occasionale, che di certo non ne fa un utilizzo giornaliero. Inoltre i convogli utilizzati hanno elevate capacità di passeggeri. Quindi è probabile che, con la domanda di traffico attuale e del prossimo futuro, non sia necessario abbandonare il sistema di distanziamento attualmente usato.

8.3 Linea Tradizionale

A priori non è possibile sapere quale sia la sezione in cui il ritardo provoca perturbazioni maggiori, perché gli effetti sono diversi a seconda di quale sia il treno affetto dal ritardo primario. Dall'esecuzione di alcune prove si sono notati i seguenti aspetti.

- Se il primo treno a fare ritardo è il Suburbano, il ritardo primario genera perturbazioni maggiori se accade nella sezione critica riferita alla successione treno lento - treno veloce: l'ultima sezione di blocco.
- Se il primo treno a fare ritardo è l'Eurocity, il ritardo primario genera perturbazioni maggiori se accade nella seconda sezione di blocco, ovvero quella intermedia tra la stazione di partenza e la successiva.
- Tra i due casi precedenti, il numero di treni coinvolti è maggiore se il primo treno a compiere ritardo è un Eurocity. Come è possibile osservare dalla Figura 8.3.1, il Suburbano successivo viene condizionato in partenza e l'Eurocity seguente all'arrivo. Nel caso in cui il ritardo primario coinvolga un Suburbano, l'Eurocity seguente è perturbato all'arrivo e quindi ciò non disturba il treno successivo che è un Suburbano.

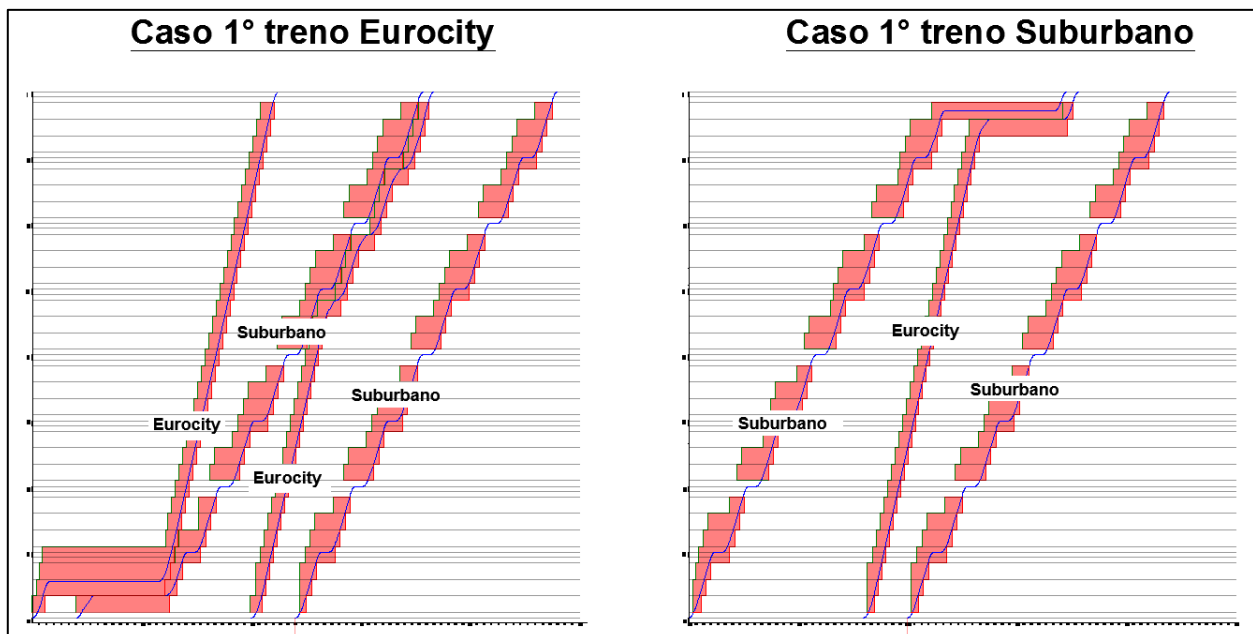


Figura 8.3.1: Diversità del numero di treni coinvolti in funzione del primo treno affetto da ritardo

8.3.1 Blocco Fisso

Il ritardo è stato posto in una zona intermedia della prima tratta interstazionale, alla progressiva 3'000 m, all'interno della 2° sezione di blocco. Negli Allegati C.5, C.6, C.7 e C.8 si può vedere come si modifichino le tracce dei treni seguenti.

Nei grafici seguenti si riportano in ascissa il treno con ritardo primario e i treni perturbati in ordine di apparizione sulla linea ed in ordinata il ritardo con cui si presentano in linea e il ritardo con cui giungono all'ultima stazione. Nel presente paragrafo è stato utilizzato il codice di calcolo basato sull'algoritmo di Figura 6.5.1.

Nel caso di 6 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 2 e la perturbazione si arresta dopo circa 35.9 minuti.

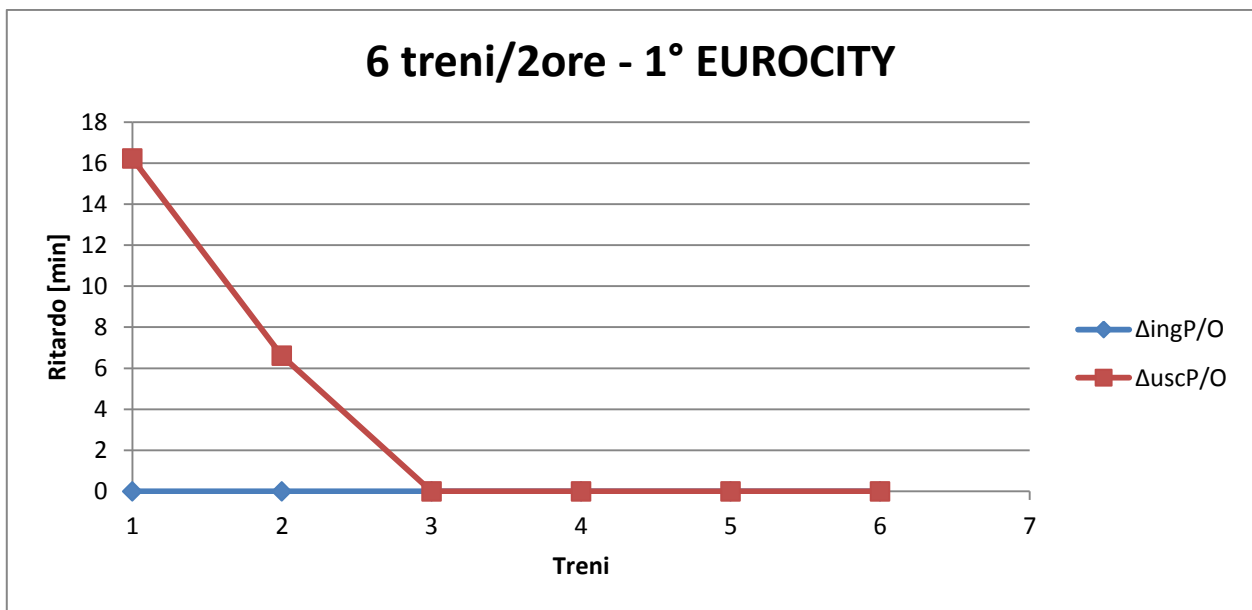


Grafico 8.3.1: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 6 tr/2h

Nel caso di 7 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 37.5 minuti.

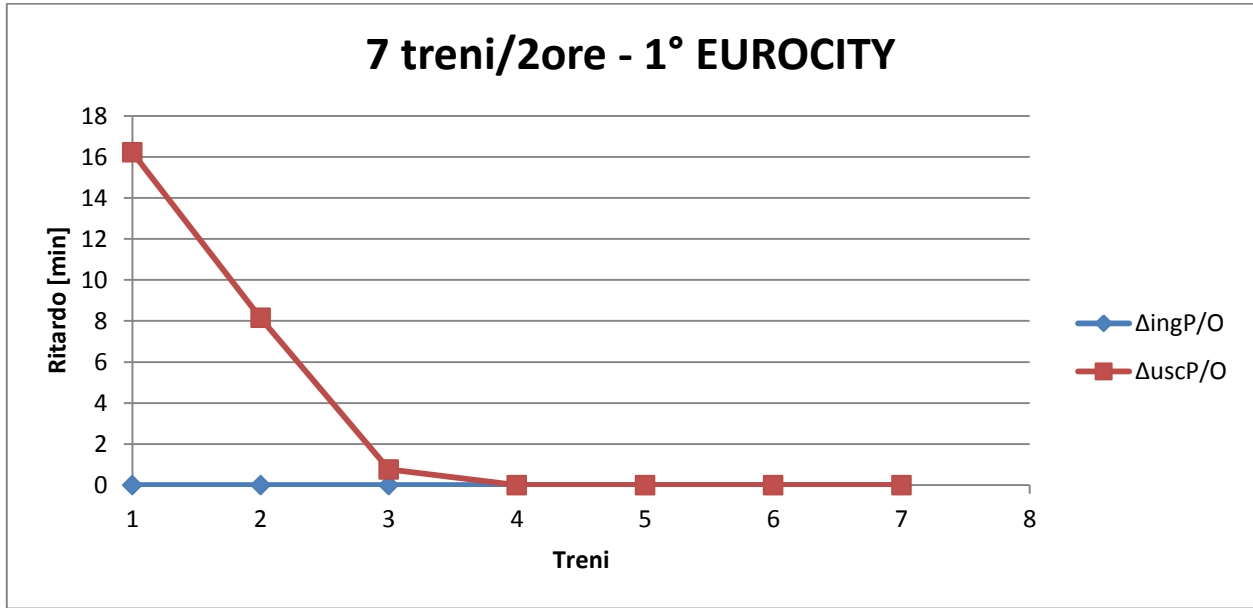


Grafico 8.3.2: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 7 tr/2h

Nel caso di 8 treni/2ore, che definiscono la capacità secondo quanto espresso dal codice UIC, i treni coinvolti dalla perturbazione sono ancora 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 37.4 minuti.

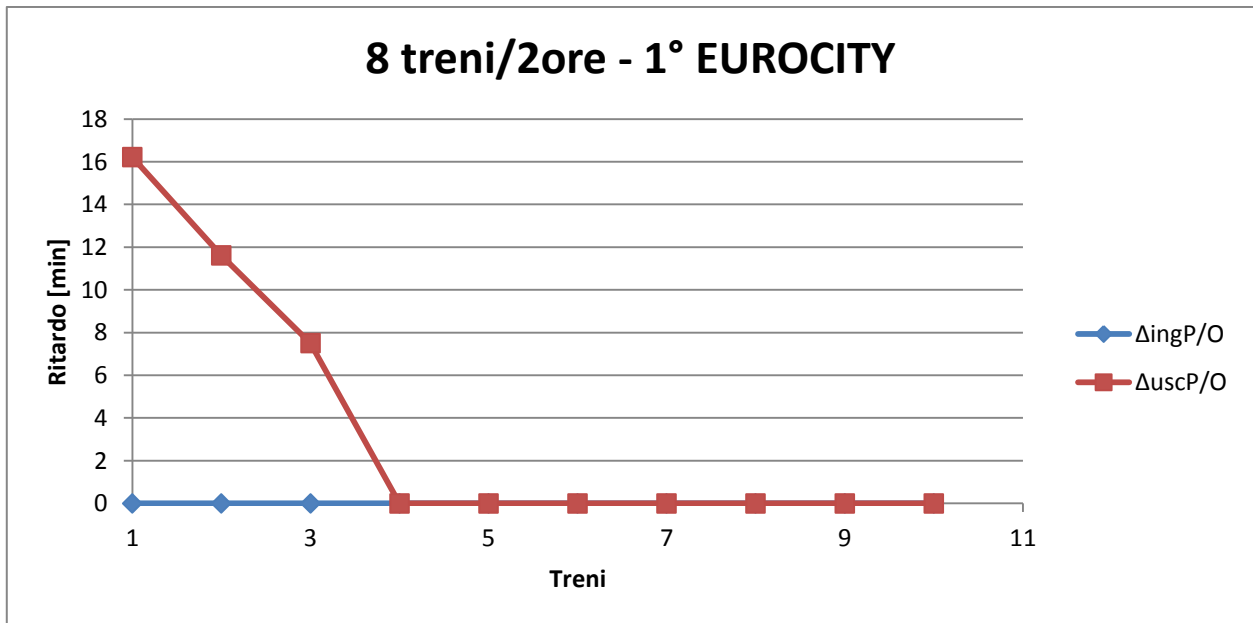


Grafico 8.3.3: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 8 tr/2h

Nel caso di 9 treni/2ore si registra una situazione analoga alla precedente, ad eccezione del ritardo in uscita dalla linea dei treni 2 e 3, che aumenta leggermente. I treni coinvolti dalla perturbazione sono 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 37.4 minuti. Sebbene si sia ormai

superato il valore di capacità previsto dal metodo UIC CODE 406, il numero di treni coinvolti rimane costante e comunque al di sotto del numero di treni/ora.

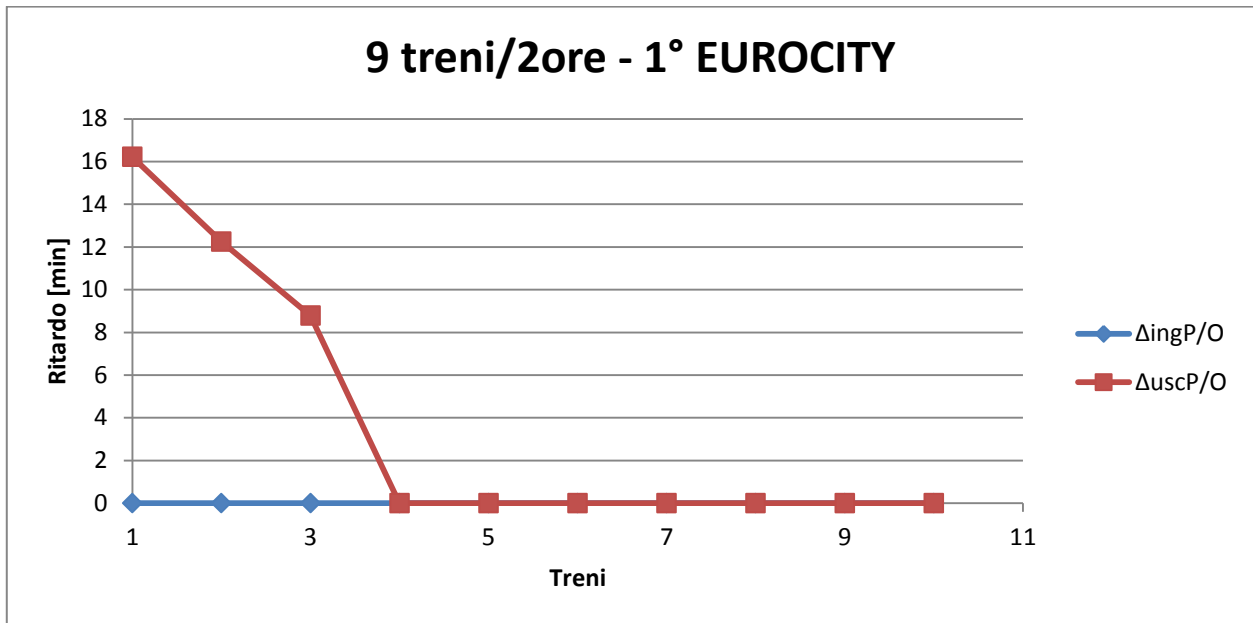


Grafico 8.3.4: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 9 tr/2h

Nel caso di 10 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono ancora 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 37.4 minuti.

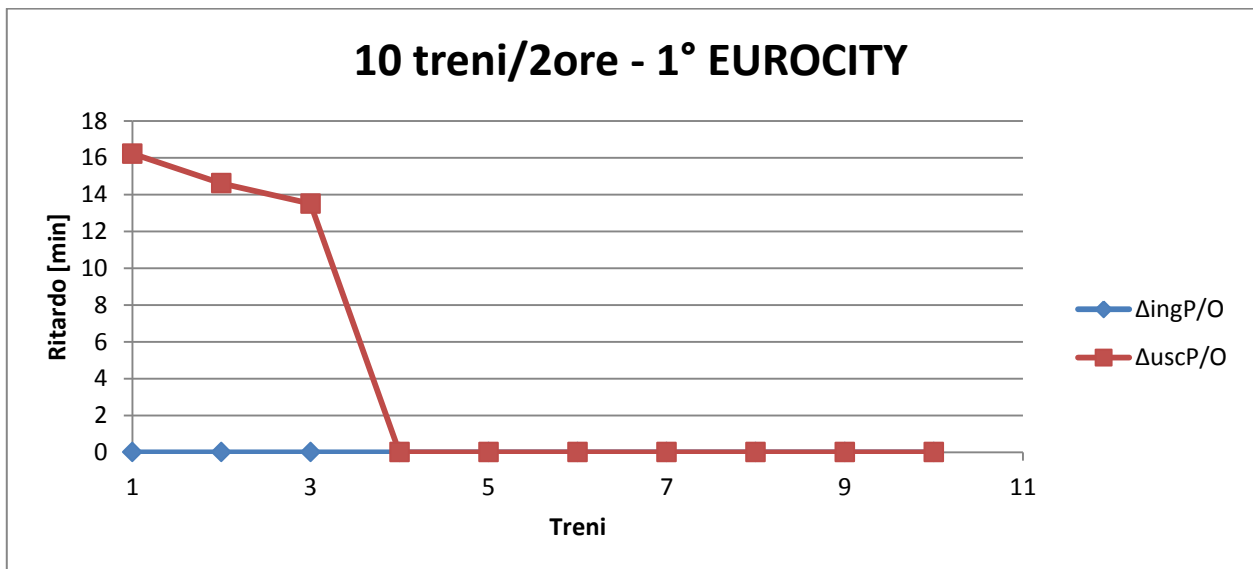


Grafico 8.3.5: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 10 tr/2h

Nel caso di 11 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono sempre 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 37.4 minuti.

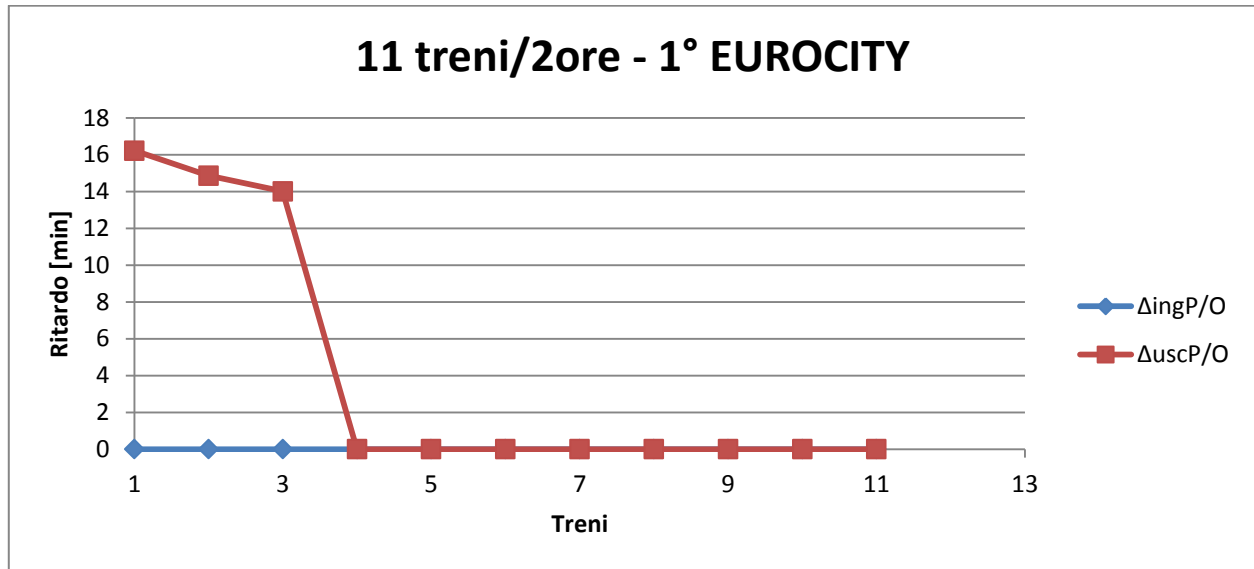


Grafico 8.3.6: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Fisso – 11 tr/2h

Non è possibile procedere oltre con l'analisi in quanto 11 treni/2ore rappresenta la capacità teorica.

8.3.1.1 Sintesi dei risultati

È possibile osservare l'andamento dei treni perturbati in funzione del numero di treni/ora previsti dall'orario. Si vede come in questo caso il numero di treni perturbati non cresce mai oltre i 3 treni, comprensivi di quello che è affetto dal ritardo primario. Tale situazione differisce notevolmente dai casi precedenti in cui si è studiata la propagazione dei ritardi in linee AV (Grafico 8.2.26 e Grafico 8.2.27) e Suburbane (Grafico 8.1.20 e Grafico 8.1.21, dove il numero di treni perturbati cresce esponenzialmente.

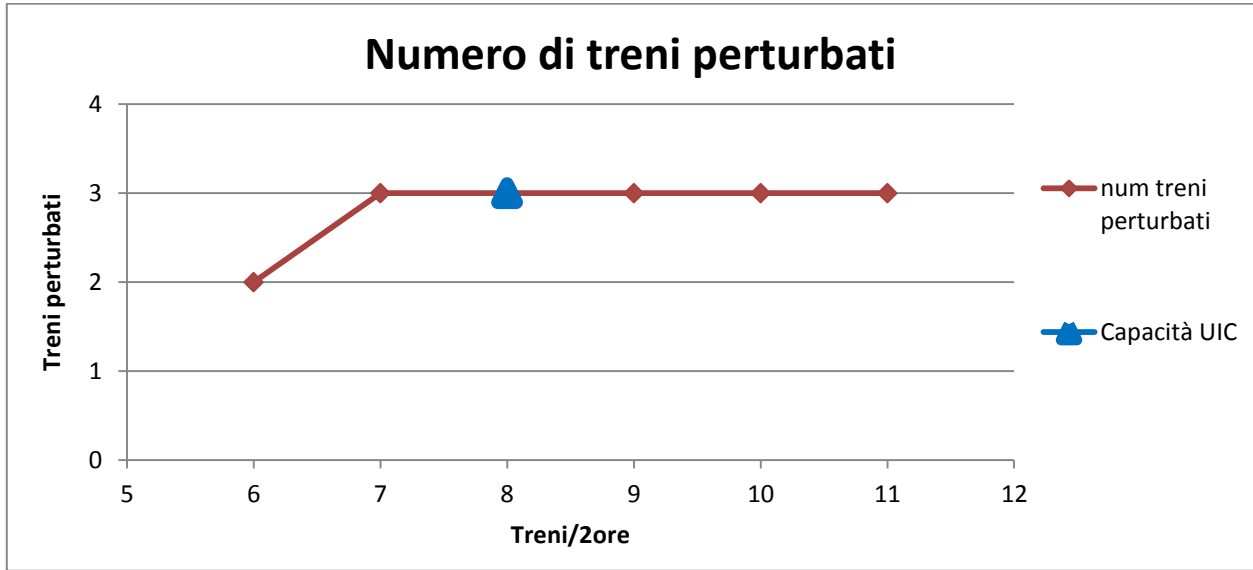


Grafico 8.3.7: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea tradizionale – Blocco Fisso

L'andamento del tempo di durata della perturbazione è raffigurato nel seguente grafico.

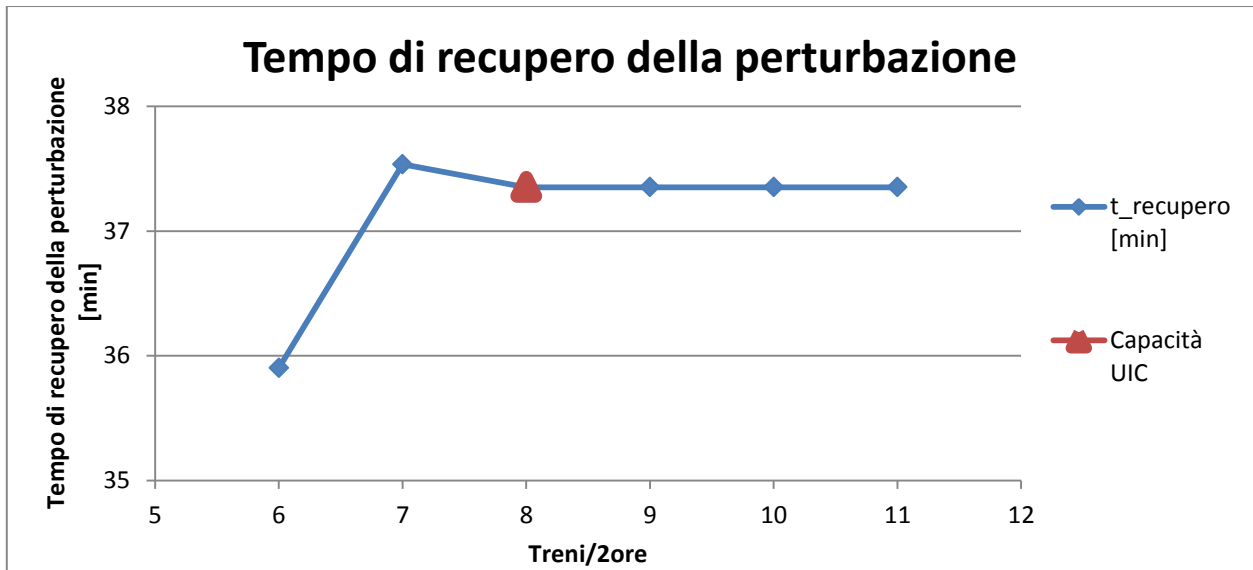


Grafico 8.3.8: Legame tra durata della perturbazione e treni/ora – linea tradizionale – Blocco Fisso

Si possono effettuare una serie di osservazioni.

Per quanto riguarda il numero di treni coinvolti, la situazione rimane stazionaria in quanto, anche con l'accostamento delle tracce senza margini, la distanza temporale nel diagramma spazio-tempo tra due treni dello stesso tipo è sempre superiore a 18 minuti. Ciò significa che una perturbazione di 15 minuti (tale è il ritardo primario) coinvolge il treno seguente ed eventualmente, per i perditempi vari di questo (frenatura e ripartenza), anche il terzo ma non oltre. Se invece i posti di

precedenza fossero più frequenti, le tracce sull'orario grafico sarebbero più ravvicinate e un ritardo primario di un quarto d'ora si farebbe sentire su un numero più elevato di treni.

I tempi di recupero si mantengono costanti, oltre la capacità pratica, in quanto la porzione di traccia perturbata dei treni coinvolti dal ritardo, il cui numero rimane costante, è sempre identica al variare del numero di treni/ora. Dal Grafico 8.3.8 si osserva un lieve picco nella durata della perturbazione per 7 treni/2ore; in questo caso, l'ultimo treno perturbato non è costretto a fermarsi ma è in grado di procedere osservando il secondo (110 km/h) e il terzo limite di velocità (180 km/h) e pertanto dovrà mantenere un distanziamento maggiore dal treno precedente rispetto all'omologo treno nel caso di 8 treni/ora. Quest'ultimo procede più lentamente ma a minor distanza dal treno che lo precede e da qui spiegato il suo minor ritardo all'arrivo.

8.3.2 Blocco Mobile

La sezione critica è posta a 3 km dall'inizio della linea, nel primo tratto interstazionale. Nel presente paragrafo è stato utilizzato il codice di calcolo basato sull'algoritmo di Figura 6.5.2.

Per l'orario originario (6 treni/2ore) il numero di treni coinvolti è 2 ed il tempo di riassorbimento della perturbazione è di 35 minuti.

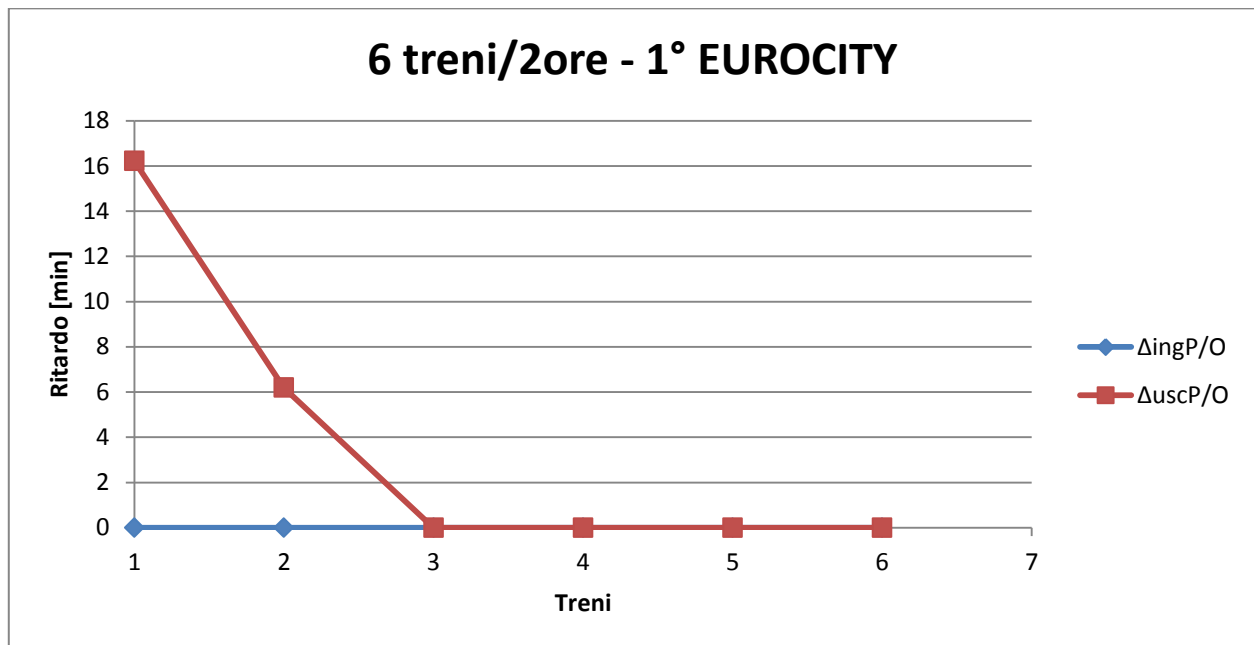


Grafico 8.3.9: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 6 tr/2h

Nel caso di 7 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 2 e la perturbazione si arresta ancora dopo circa 35 minuti.

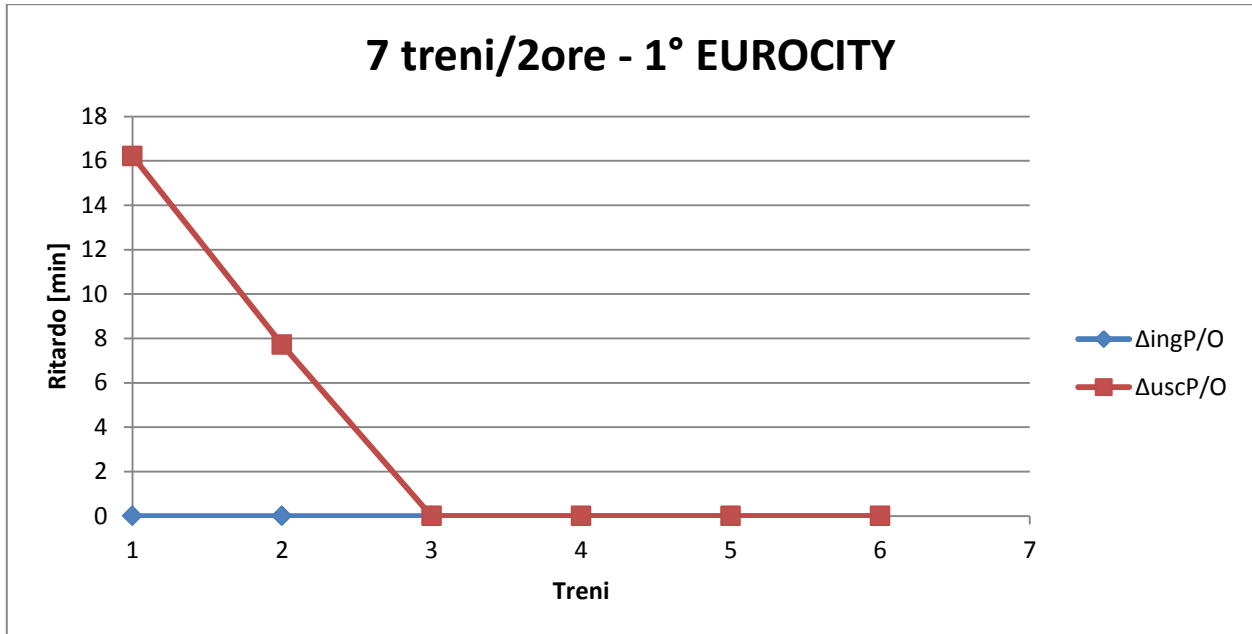


Grafico 8.3.10: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 7 tr/2h

Nel caso di 8 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione crescono a 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 36 minuti.

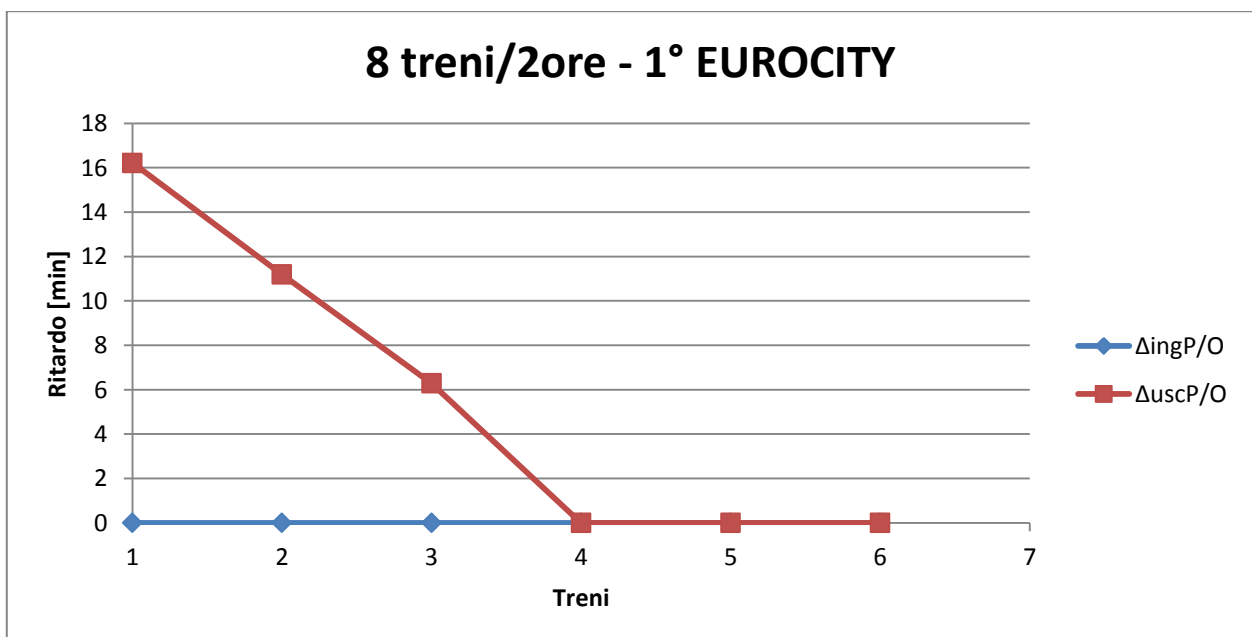


Grafico 8.3.11: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 8 tr/2h

Nel caso di 9 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 36 minuti.

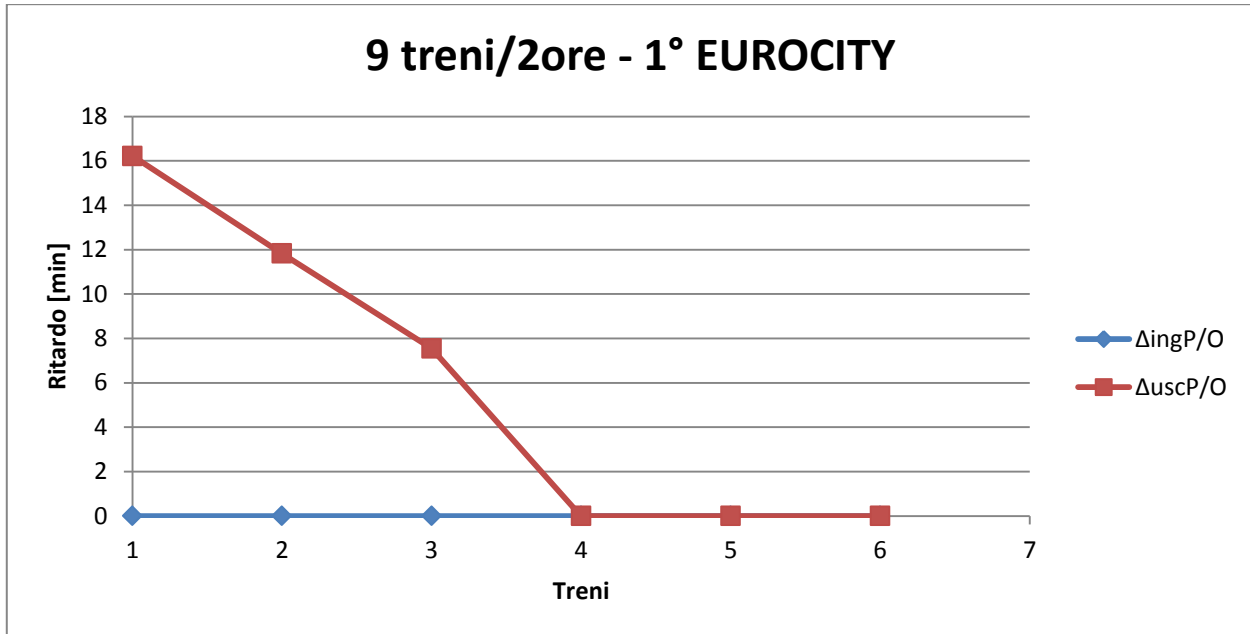


Grafico 8.3.12: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 9 tr/2h

Nel caso di 10 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 36 minuti.

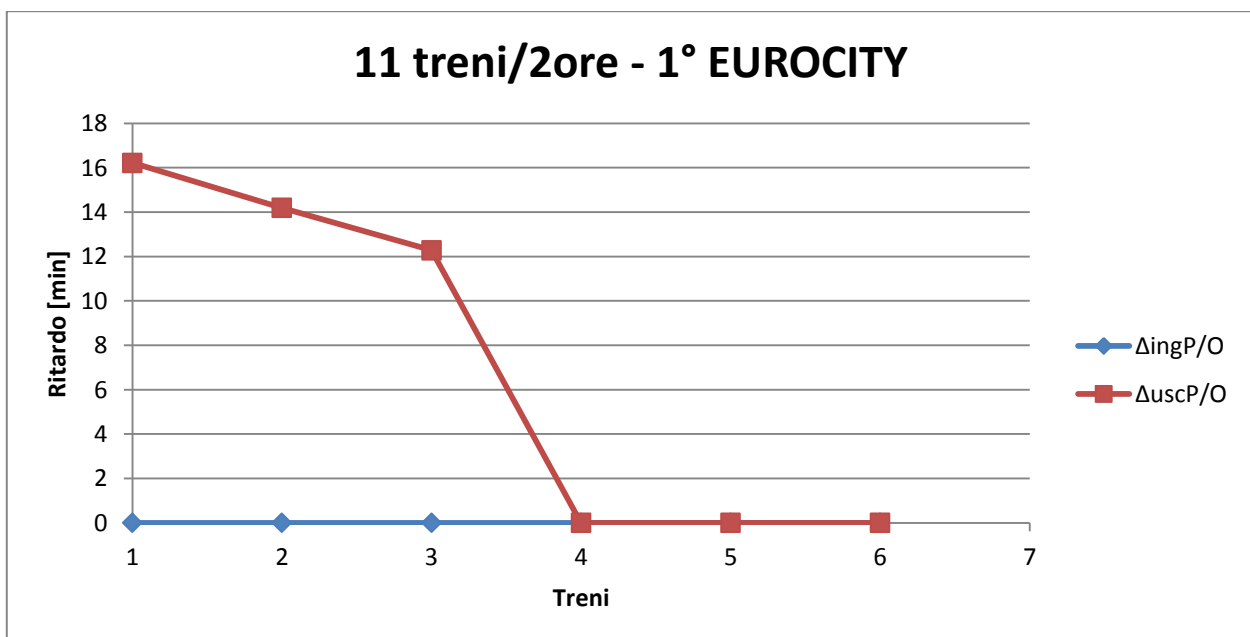


Grafico 8.3.13: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 10 tr/2h

Nel caso di 11 treni/2ore i treni coinvolti dalla perturbazione sono 3 e la perturbazione si arresta dopo circa 36 minuti. La propagazione è diventata stazionaria e non ha senso indagare ulteriori casi con un numero di treni più elevato. Inoltre 11 treni/2ore rappresenta la capacità teorica della linea e quindi non è possibile prevedere ulteriori tracce nell'orario.

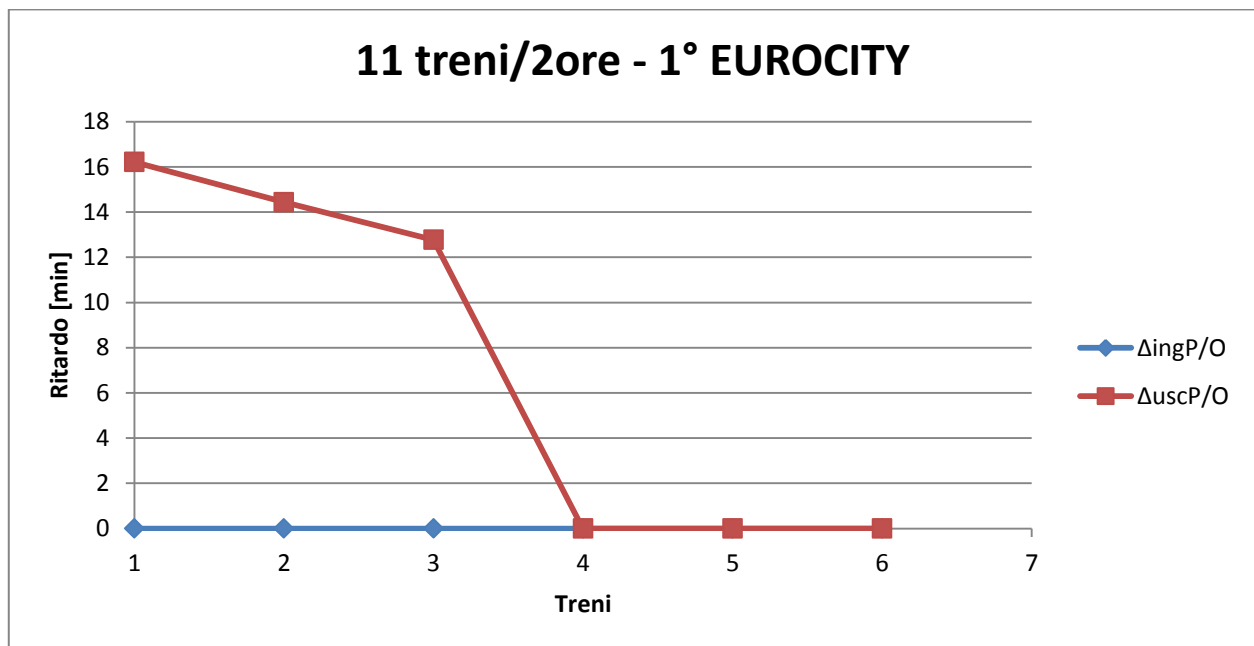


Grafico 8.3.14: Propagazione dei ritardi – linea tradizionale – Blocco Mobile – 11 tr/2h

8.3.2.1 Sintesi dei risultati

È possibile osservare l'andamento dei treni perturbati in funzione del numero di treni/ora previsti dall'orario. La situazione rimane stabile all'aumentare del numero di treni/ora.

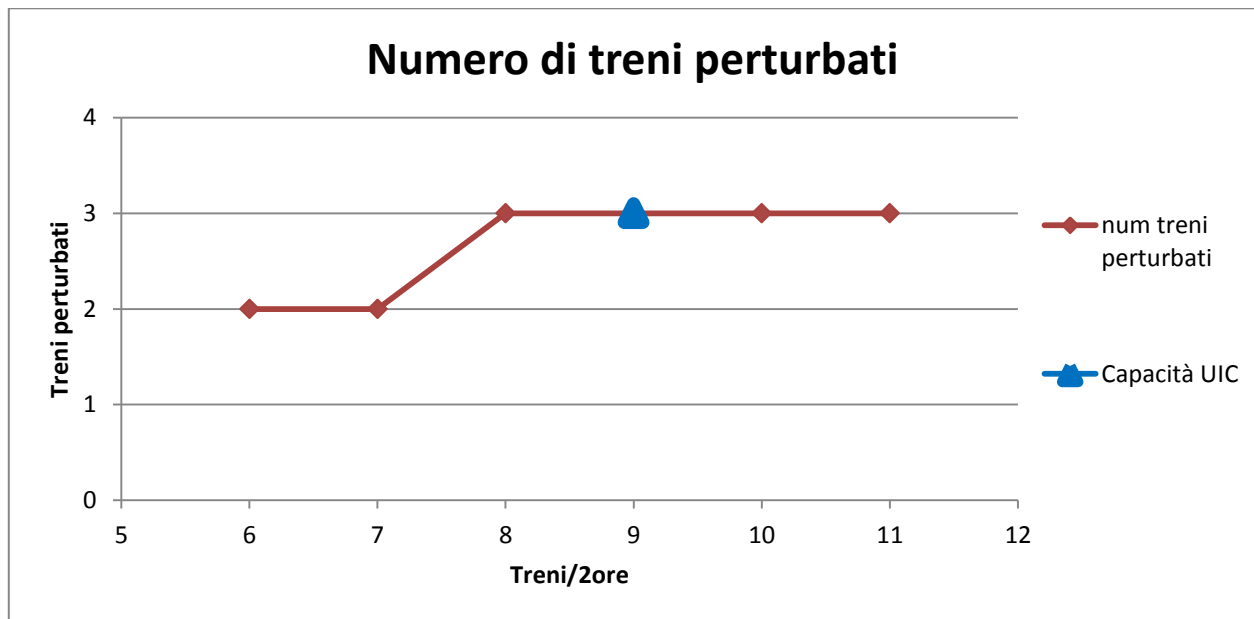


Grafico 8.3.15: Legame tra treni perturbati e treni/ora – linea tradizionale – Blocco Mobile

Il grafico riguardante i tempi di durata della perturbazione è il seguente.

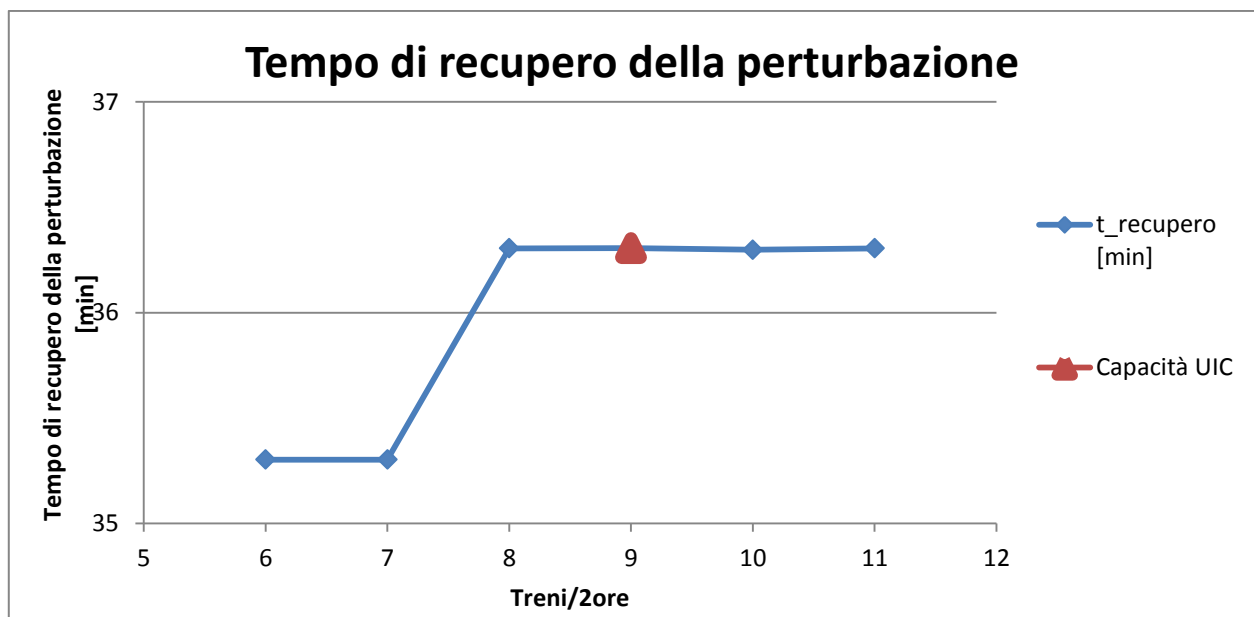


Grafico 8.3.16: Legame tra durata della perturbazione e treni/ora – linea tradizionale – Blocco Mobile

Le osservazioni sono le medesime espresse per il Blocco Fisso: numero di treni coinvolti e tempi di recupero costanti oltre il limite di capacità pratico. Nel Grafico 8.3.16 non si nota più il picco di durata presente nel Grafico 8.3.8 in quanto il sistema a Blocco Mobile è più flessibile (non essendoci limiti di velocità non ci sono discontinuità del distanziamento al variare della velocità).

8.3.3 Confronto

Si mettono ora a confronto le due situazioni. Il grafico seguente raffigura il numero di treni coinvolti nei due sistemi di distanziamento in funzione del numero di treni/ora.

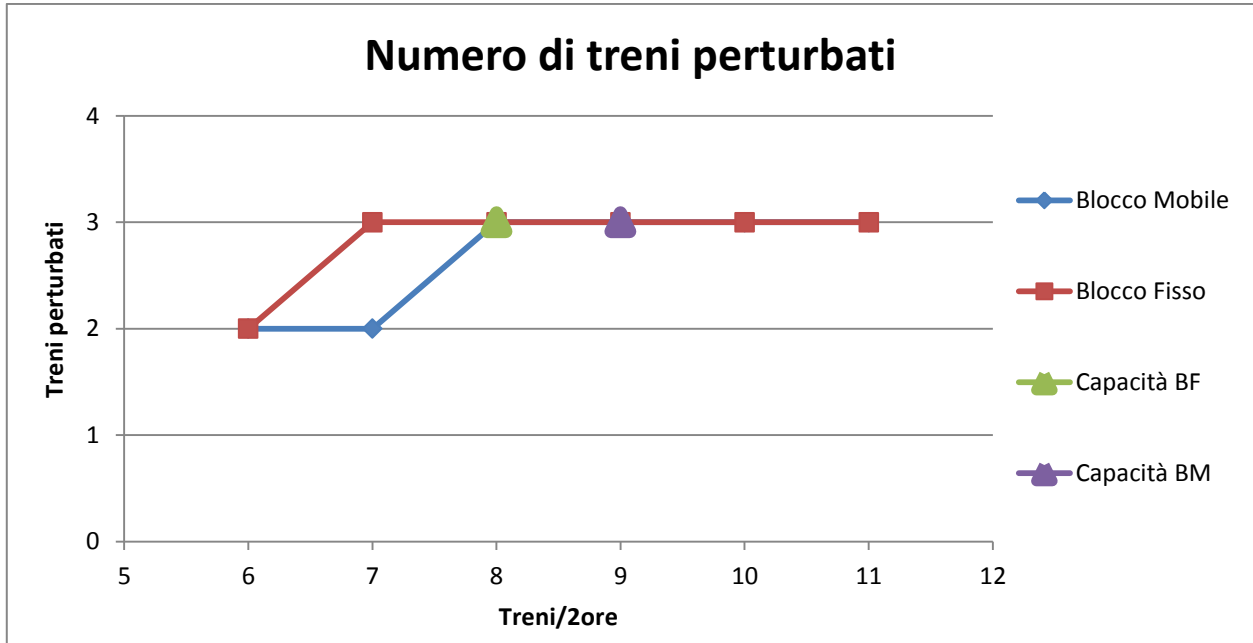


Grafico 8.3.17: Confronto del numero dei treni coinvolti nei due sistemi di distanziamento – linea tradizionale

La stessa cosa per quanto riguarda il tempo di durata del disturbo.

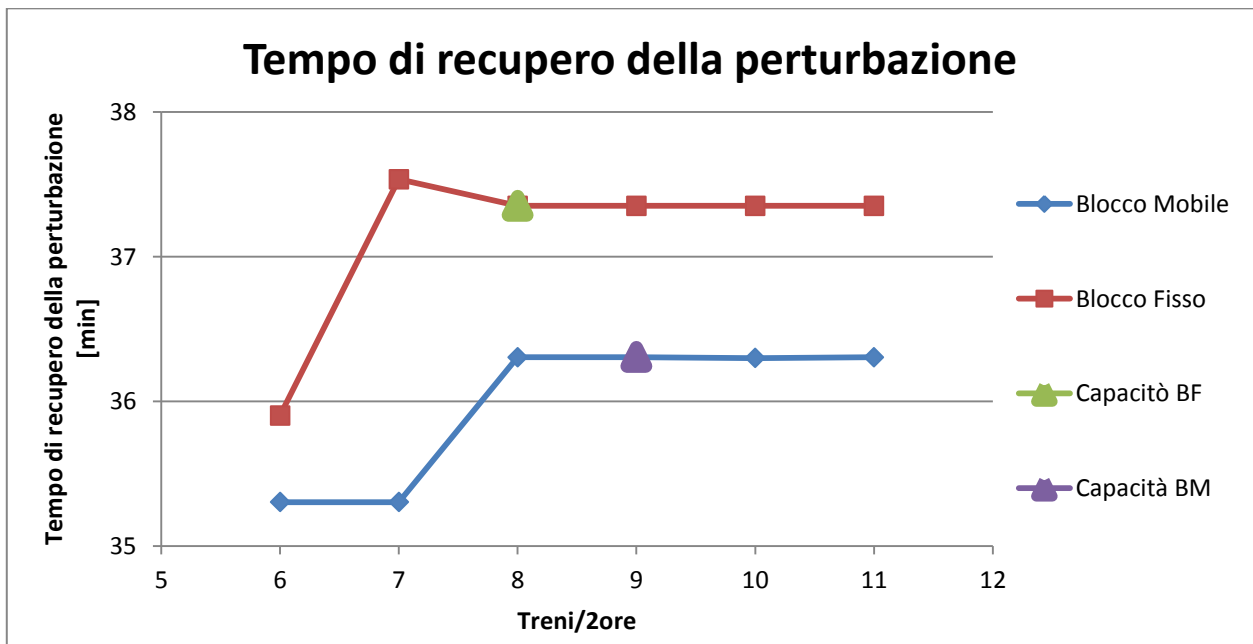


Grafico 8.3.18: Confronto della durata della perturbazione nei due sistemi di distanziamento – linea tradizionale

Dall'analisi di tali grafici, si può affermare che in termini di numero di treni perturbati, i due sistemi di distanziamento si equivalgono sulla linea ideale considerata. Tuttavia, diminuendo la lunghezza della sezione di linea compresa tra due posti di precedenza e quindi aumentando il numero di treni, il distanziamento a Blocco Mobile è più vantaggioso di quello a Blocco Fisso.

Per quanto riguarda il tempo di recupero della perturbazione si vede come il distanziamento a Blocco Fisso determina una durata maggiore della perturbazione, se pur di una quantità non elevata (circa 1 minuto). Questo è dovuto al fatto che le tracce dei treni generano un'occupazione di infrastruttura maggiore nel Blocco Fisso rispetto al Blocco Mobile a causa della non ottimale compattazione delle tracce in fase di accelerazione e decelerazione. Pertanto questo perditempo, accumulato dai primi tre treni, genera la differenza nel tempo di recupero della perturbazione visibile nel Grafico 8.3.18.

9 CONCLUSIONI

Si traggono in questo capitolo delle conclusioni di validità generale riguardo allo studio compiuto nel presente lavoro. Dalle analisi effettuate e dai risultati ottenuti, la capacità delle linee gestite con il sistema di distanziamento a Blocco Mobile risulta maggiore rispetto a quelle con Blocco Fisso. Questa superiorità la si riscontra soprattutto su linee omotachiche, come quelle suburbane o quelle ad alta velocità. Il motivo di questa differenza tra le potenzialità dei due sistemi consiste nel distanziamento che devono mantenere i convogli. Anche ipotizzando di non richiedere franchi di sicurezza e se le sezioni di blocco fossero fissate in modo tale da garantire la sola distanza di arresto, affinché un treno possa viaggiare indisturbato, dovrebbe osservare una distanza pari a quella di arresto più una sezione di blocco. Infatti il rilevamento della posizione del treno con il Blocco Fisso avviene discretamente, in corrispondenza di ogni sezione, pertanto tra i distanziamenti spaziali con i due sistemi vi è una differenza pari alla lunghezza della sezione di blocco. All'accorciarsi di dette sezioni la differenza di prestazione dei due sistemi tende ad assottigliarsi sempre più, tanto è vero che i sistemi di distanziamento a Blocco Fisso ultracorto possono essere assimilati, in quanto a prestazioni in termini di capacità, ai sistemi a Blocco Mobile.

Per quanto riguarda le linee suburbane assimilabili a quella studiata nel presente lavoro, il distanziamento a Blocco Mobile consente di raggiungere una capacità intorno al 20% superiore in termini di numero di treni/ora rispetto al Blocco Fisso. Tuttavia, mediante opportuni interventi, è possibile incrementare di una pari quantità la capacità delle linee gestite con Blocco Fisso. Tali interventi consisterebbero principalmente nel diminuire del 25% i seguenti fattori: durata delle fermate (occorrono convogli che abbiano accessibilità migliore), tempi tecnici (upgrade delle tecnologie di rilevamento occupazione e trasmissione dati) e lunghezza delle sezioni blocco. Dall'analisi sulla propagazione dei ritardi si ottiene che, fintantoché si considerano situazioni di non saturazione, i due sistemi forniscono risultati paragonabili in termini di numero di treni coinvolti dal ritardo e di durata della perturbazione.

Sulle linee ad alta velocità, i vantaggi derivanti dall'utilizzo del Blocco Mobile sono i più evidenti tra le linee studiate: si ha una capacità in termini di treni/ora intorno al 60% superiore rispetto al sistema di distanziamento a Blocco Fisso. Dal momento che il distanziamento spaziale tenuto con il

Blocco Fisso è maggiore di una quantità pari alla lunghezza della sezione di blocco, per questo tipo di linee si ha la maggior differenza in termini di capacità, in quanto si tratta, tra le linee considerate, di quella con le sezioni di blocco maggiormente lunghe. A questo bisogna aggiungere che si è considerato che i treni, con il Blocco Fisso, devono seguire una successione di fasi di decelerazione, in modo tale da non richiedere che le sezioni immediatamente successive alle stazioni siano libere. Dato l'elevato divario di capacità tra i due sistemi, con opportuni interventi è possibile anche in questo caso migliorare le prestazioni ottenibili con il Blocco Fisso, ma è difficile avvicinarsi alle quelle offerte dal Blocco Mobile. I parametri maggiormente discriminanti sulla capacità per il Blocco Fisso sono i limiti di velocità e la lunghezza delle sezioni di blocco, nella cui definizione occorre tenere presente che sono correlati e che vanno ottimizzati gli uni rispetto agli altri. Va comunque detto che la situazione conosciuta è generalmente lontana, per questo tipo di linee, dalle condizioni di saturazione, pertanto attualmente il problema della capacità risulta più pressante su altre tipologie di linee. Si è osservato nella propagazione dei ritardi che la risposta dei due sistemi è analoga per un numero di treni inferiore o uguale alla capacità che si ha con il Blocco Fisso. Si è inoltre osservato che l'utilizzo di sezioni di blocco concatenate garantisce un contenimento della propagazione dei ritardi, anche per un numero di treni/ora di poco superiore al valore di capacità pratica. Infatti, con le sezioni concatenate, i treni perturbati hanno maggiori probabilità di procedere comunque senza doversi per forza arrestare, anche se dovendo rispettare un limite di velocità più restrittivo, permettendo così una maggiore flessibilità nella gestione dei ritardi.

Nelle linee tradizionali, dove il traffico è costituito da un insieme di convogli variegato effettuanti servizi di tipo diverso gli uni dagli altri, l'elemento che condiziona principalmente la capacità della linea è l'eterotachia. La diversa velocità media tenuta dai convogli ha come conseguenza che la compattazione delle tracce non è ottimale. Il minimo distanziamento tra i treni si ha o all'ingresso della linea (successione treno veloce - treno lento) oppure al termine (treno lento - treno veloce). Ne consegue che tra una traccia e la successiva rimangono nel complesso ampi distanziamenti spaziali e temporali. Pertanto, seppure il distanziamento a Blocco Mobile sia comunque più vantaggioso, tale superiorità risulta trascurabile, soprattutto al crescere della distanza tra due posti di precedenza. Il parametro che influenza maggiormente la capacità in linee a traffico eterotachico è appunto la distanza tra i posti di precedenza, in quanto un loro avvicinamento

consente di ridurre la perdita di capacità dovuta al non perfetto accostamento delle tracce. In generale hanno un'incidenza positiva sulla capacità anche tutti quegli interventi che permettono una riduzione dell'eterotachia. Tra di essi vi sono quindi la diminuzione della differenza di velocità d'orario tra le due tipologie di treno e, per il treno con il maggior tempo di percorrenza, la diminuzione dei tempi di fermata, una maggiore accelerazione e l'aumento della velocità d'orario. Siccome la capacità è simile e scarsamente dipendente dal tipo di distanziamento adottato, anche la propagazione dei ritardi nei due sistemi è pressoché identica sia in termini di numero di treni coinvolti che di durata della perturbazione.

Nel presente elaborato ci si è concentrati sulla determinazione della capacità con un traffico corrispondente a quello delle ore di punta. Tuttavia le società di Gestione dell'Infrastruttura potrebbero avere anche la necessità di determinare il numero di tracce di treni merci che è possibile inserire nelle ore di morbida con i due sistemi di distanziamento ed al variare dei parametri studiati. Ad ogni modo, gli strumenti presentati in questo lavoro, sia come procedure di calcolo che come software realizzati, ben si prestano anche per questa finalità.

Un possibile sviluppo futuro potrebbe essere lo studio di come l'adozione di sistemi di distanziamento a Blocco Mobile possa portare a vantaggi nella circolazione ferroviaria in nodi e stazioni.

10 BIBLIOGRAFIA

- [1] A.N.S.F., *Norme per la circolazione dei rotabili. Norme per l'Esercizio delle Apparecchiature Tecnologiche.*, Edizione 2008. Aggiornamento n.13/2009..
- [2] A.N.S.F., *Norme per l'esercizio delle linee AV/AC attrezzate con ERTMS/ETCS Livello 2 senza segnali fissi luminosi.*, Edizione 2008. Aggiornamento n.13/2009..
- [3] R. Maja, *Circolazione Ferroviaria*, Milano, 2011.
- [4] A. Kahan, *Railway Capacity Analysis and Related Methodology*, Ottawa/Hull, 1979.
- [5] S. Skarstætherhagen, *Capacity of Railway Lines*, 1993.
- [6] S. R. Longo G., *Estimation of railway capacity using stochastic differential equations*, Hannover, 2007.
- [7] W. Barter, *ERTMS Level 2: effect on capacity compared to "best practice" conventional signalling*, 2008.
- [8] U.I.C., *UIC Code 404. Capacity.*, Paris, 2004.
- [9] R.F.I., *Determinazione della capacità di infrastruttura ferroviaria: Linee*, Roma, 2004.
- [10] A. Delfino e M. Galaverna, «Blocco fisso e blocco mobile: analisi di potenzialità,» *Ingegneria Ferroviaria*, vol. 6/2003, pp. 555-565, 2003.
- [11] H. Sporleder, «Continues Automatic Train Control and Cab Signalling with the LZB 80,» in *International Conferende on Main Line Railway Electrification*, York, UK, 1989.
- [12] A. Landex, *Methods to estimate railway capacity and passenger delays*, Lyngby: DTU Transport, 2008.

- [13] F. Accattatis, «La propagazione delle perturbazioni nella circolazione omotachica,» *Ingegneria Ferroviaria*, vol. 5/1992, pp. 280-293, 1992.
- [14] C. W. G. *Capacity Management (Capman Phase 3)*, Paris: International Union of Railways (U.I.C.), 2004.
- [15] R. Maja, *Elementi di trazione elettrica*, Milano, 2010.
- [16] G. Cassano, *Elementi dei tracciati ferroviari*, Milano, 2009.
- [17] R. A. Verkehrswissenschaftliches Institut, *Influence of ETCS on line capacity. Generic study.*, Paris: International Union of Railways (U.I.C.), 2008.
- [18] I. A. Hansen e J. Pacht, *Railway Timetable & Traffic*, Hamburg: Eurail press, 2008.
- [19] E. Wendler, «ETCS und Kapazität.,» in *VDE Kongress 2006*, Aachen, 2006.
- [20] E. Wendler, «Weiterentwicklung der Sperrzeitentreppe für moderne Signalsysteme,» *Signal und Draht*, vol. 87, n. 7/8, pp. 268-273, 1995.
- [21] R.F.I., *Prefazione Generale all'Orario di Servizio*, Edizione 1963. Aggiornamento n.10/2002..
- [22] S. Skarstæterhagen, *Capacity of Railway Lines*, 1993.
- [23] M. Vromans, *Reliability of Railway Systems*, Rotterdam, 2005.
- [24] R. Lombardi, *Approcci innovativi per il calcolo della potenzialità pratica di reti ferroviarie complesse, basati su parametri di qualità delle tracce orarie e sul loro processo di assegnazione*, Milano, 2005.
- [25] P. Genovesi e D. Ronzino, «Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario. Un modello di calcolo,» *Ingegneria Ferroviaria*, n. 7/8, pp. 571-584, 2006.
-

11 SITOGRAFIA

www.rfi.it

<http://www.railway-technical.com/>

<http://www.deutschebahn.com>

<http://www.cifi.it/>

<http://ipaalcamo.com/comenius/Italiano/Galileo%20Ferraris/Storia%20Motore.htm>

<http://www.ansaldobreda.it>

<http://bombardier.com/en/transportation>

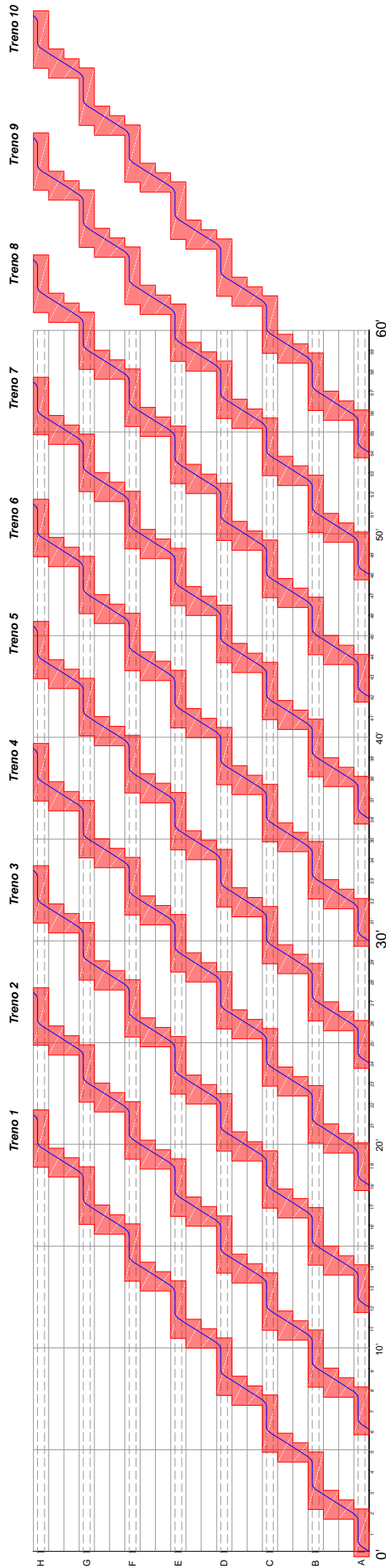
<http://www.alstom.com/transport/products-and-services/rolling-stock/>

www.trenord.it

www.trenitalia.it

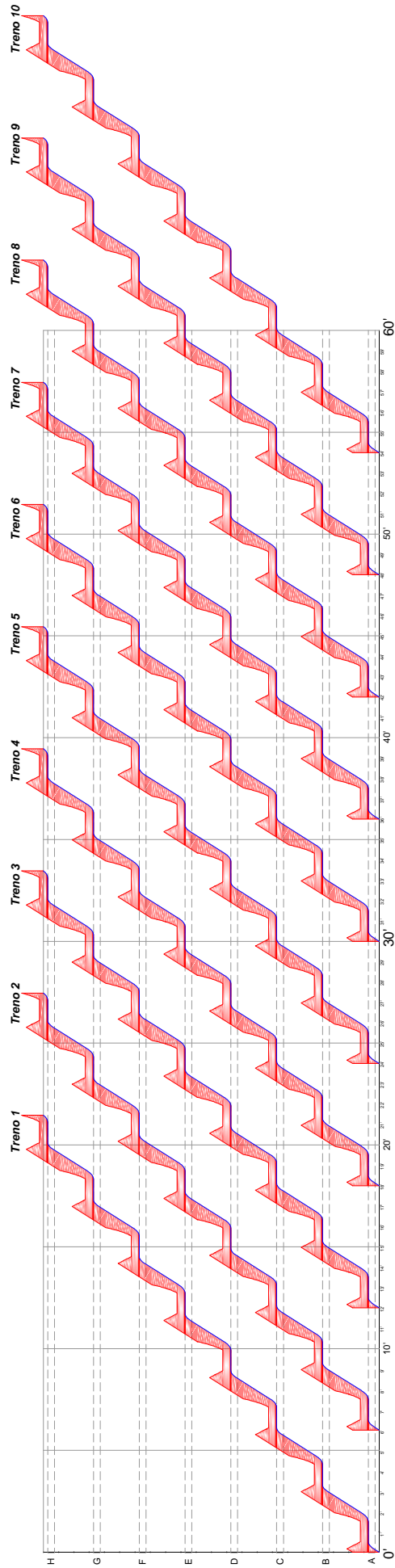
ALLEGATO A.1: ORARIO ORIGINALE - LINEA SUBURBANA - B.F.

10 treni/ora - distanziamento alla partenza = 6 min



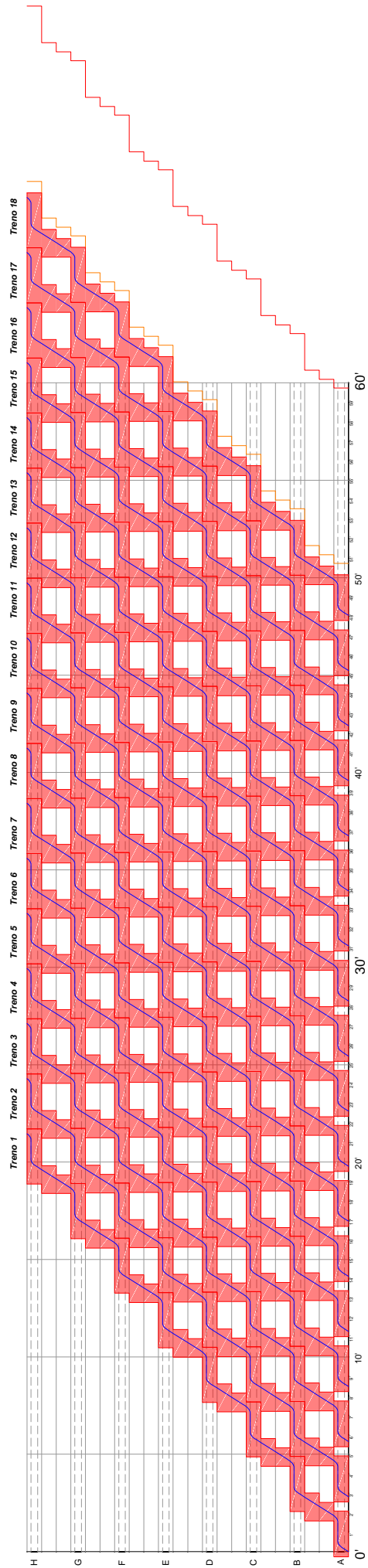
ALLEGATO A.2: ORARIO ORIGINALE - LINEA SUBURBANA - B.M.

10 treni/ora - distanziamento alla partenza = 6 min



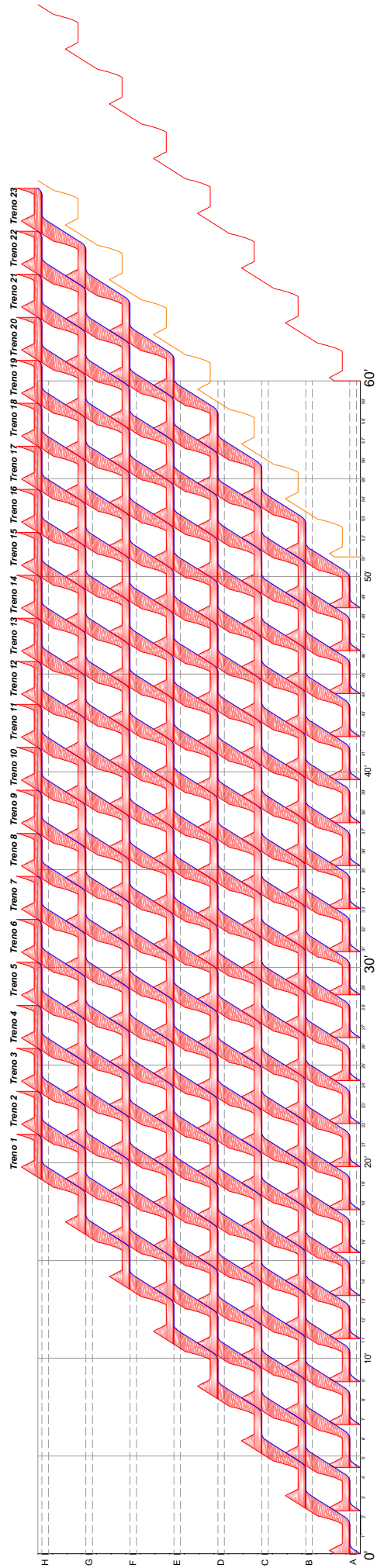
ALLEGATO A.3: CAPACITA' PRATICA - LINEA SUBURBANA - B.F.

18 treni/ora - distanziamento minimo alla partenza = 2.83 min



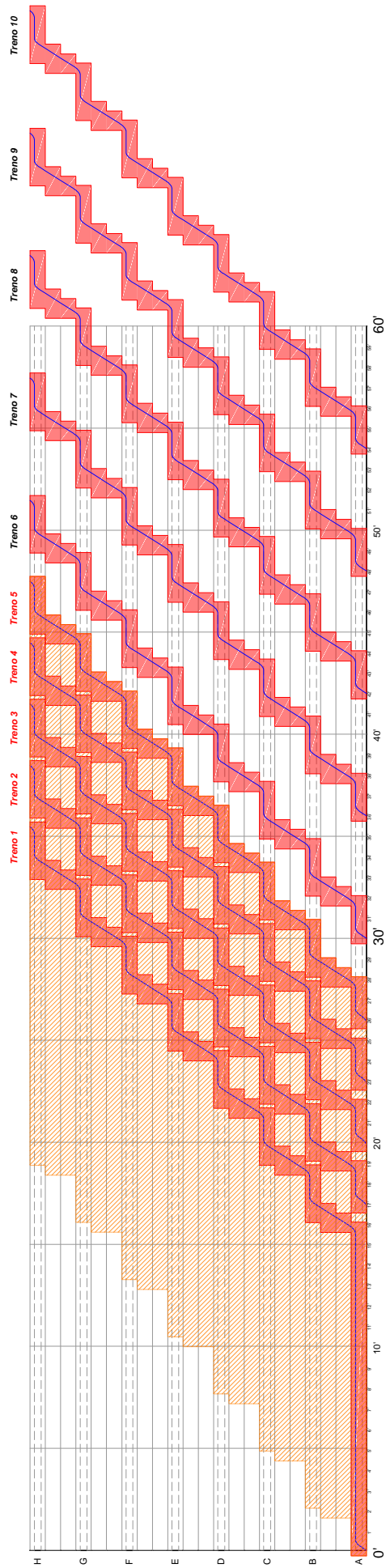
ALLEGATO A.4: CAPACITA' PRATICA - LINEA SUBURBANA - B.M.

23 treni/ora - distanziamento minimo alla partenza = 2.2 min



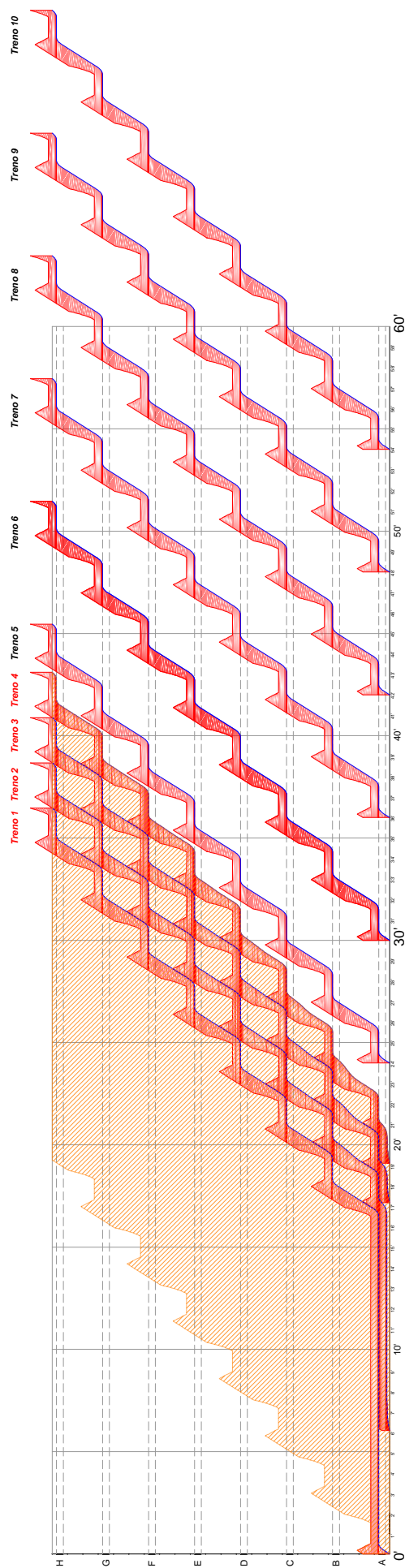
ALLEGATO A.5: RITARDO PRIMARIO - ORARIO ORIGINALE - LINEA SUBURBANA - B.F.

10 treni/ora - distanziamento alla partenza = 6 min



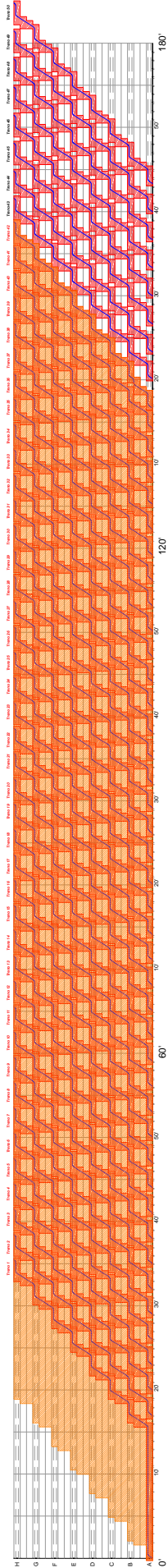
ALLEGATO A.6: RITARDO PRIMARIO - ORARIO ORIGINALE - LINEA SUBURBANA - B.M.

10 treni/ora - distanziamento alla partenza = 6 min



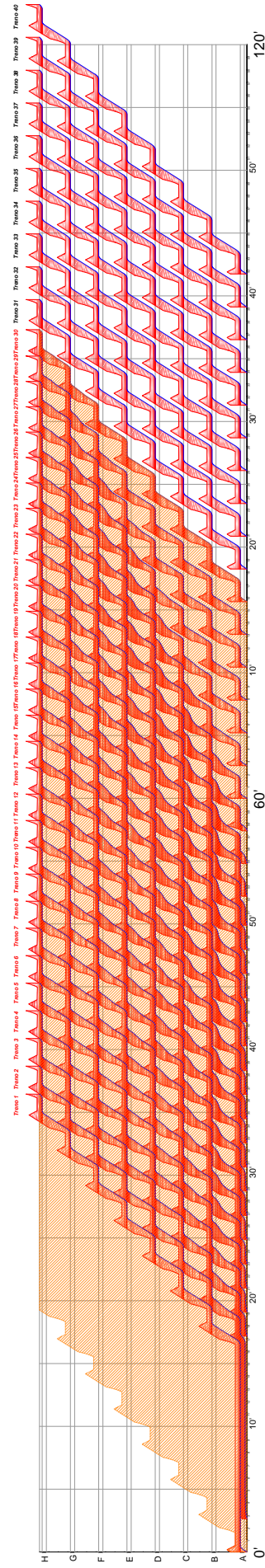
ALLEGATO A.7: RITARDO PRIMARIO - CAPACITA' PRATICA - LINEA SUBURBANA - B.F.

18 treni/ora - distanziamento alla partenza = 3.33 min

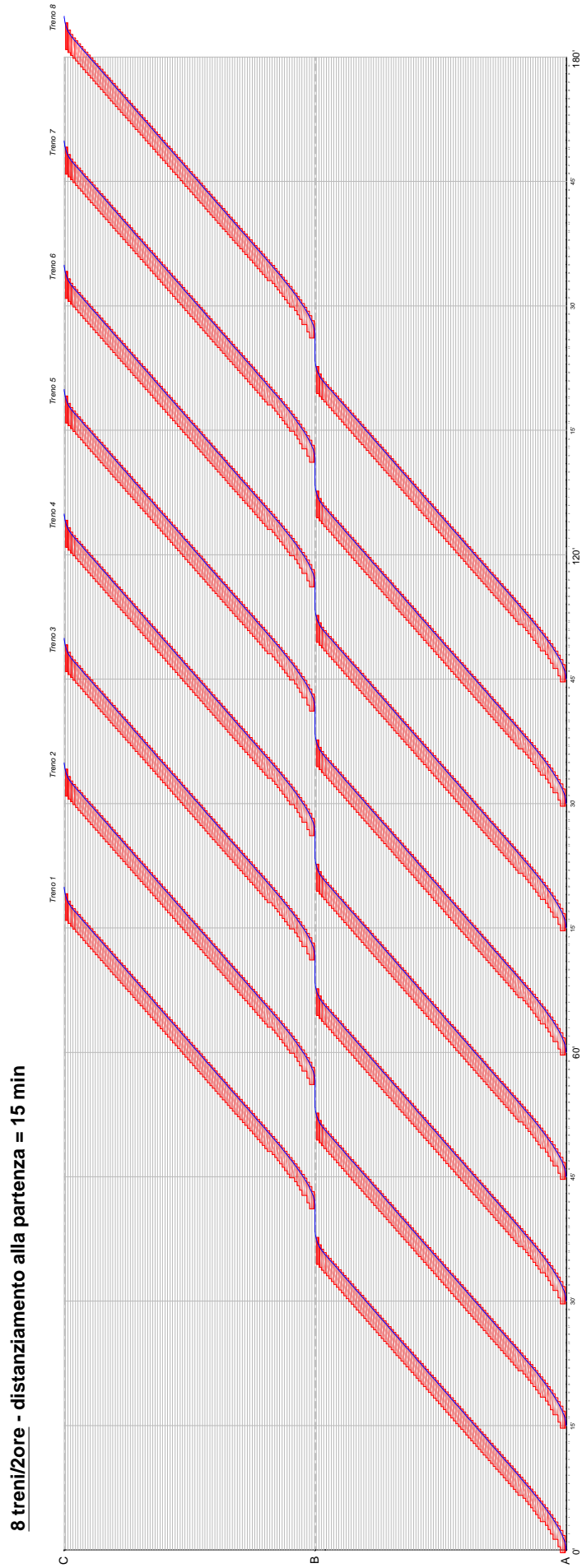


ALLEGATO A.8: RITARDO PRIMARIO - CAPACITA' PRATICA - LINEA SUBURBANA - B.M.

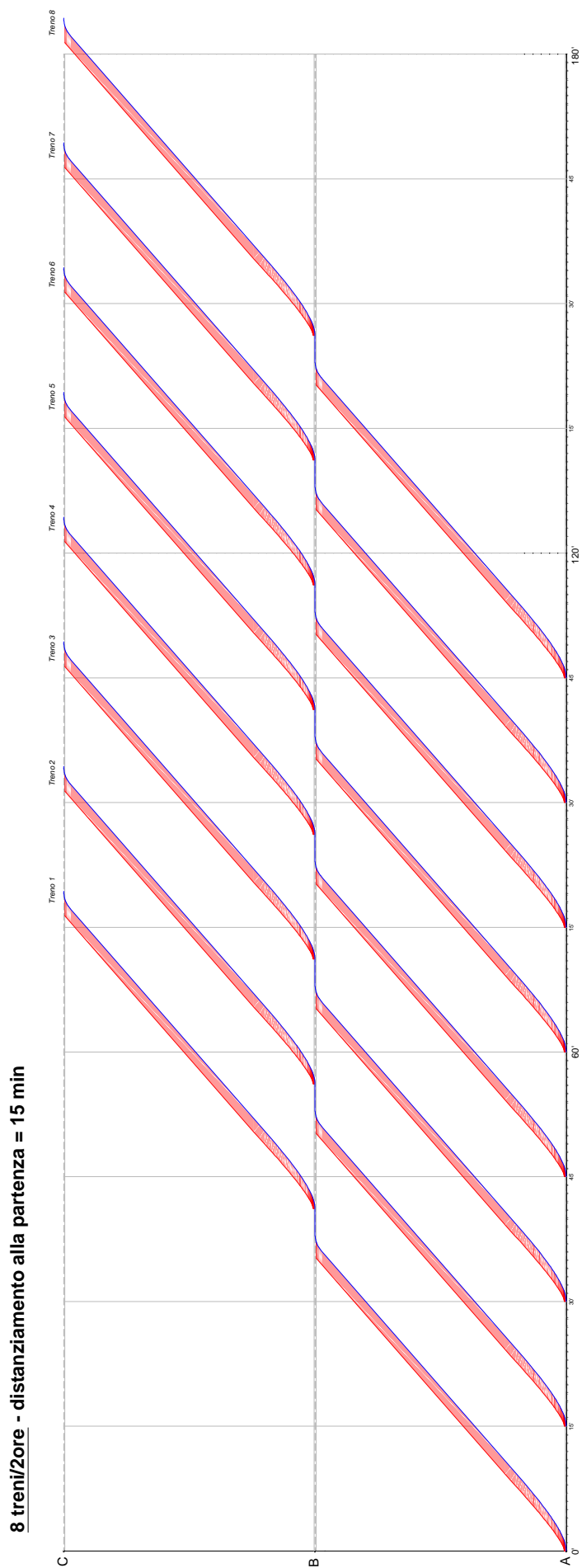
23 treni/ora - distanziamento alla partenza = 2.59 min



ALLEGATO B.1: ORARIO ORIGINALE - LINEA A.V. - B.F.

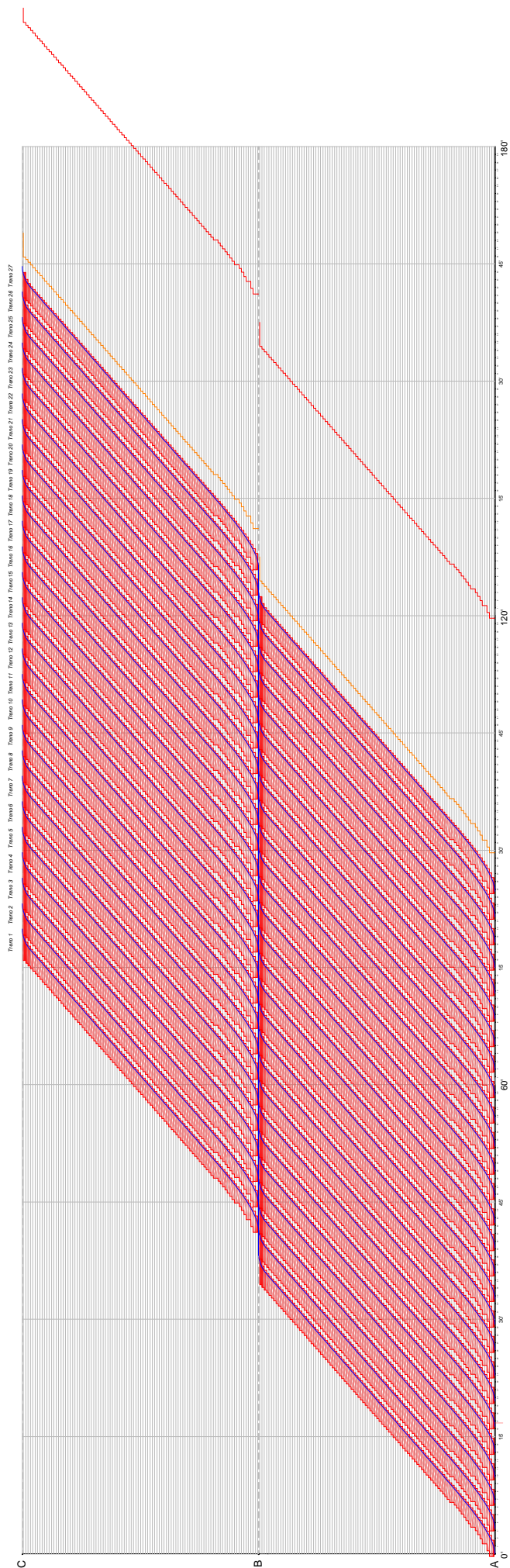


ALLEGATO B.2: ORARIO ORIGINALE - LINEA A.V. - B.M.



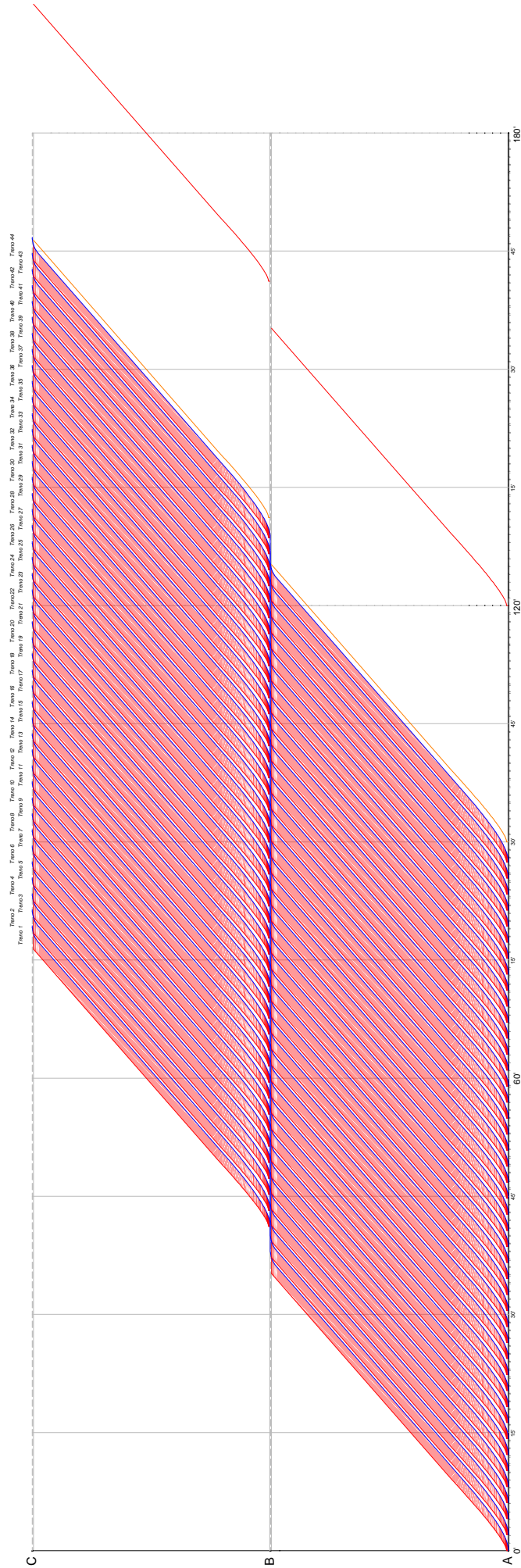
ALLEGATO B.3: CAPACITA' PRATICA - LINEA A.V. - B.F.

27 treni/2ore - distanziamento minimo alla partenza = 3.26 min

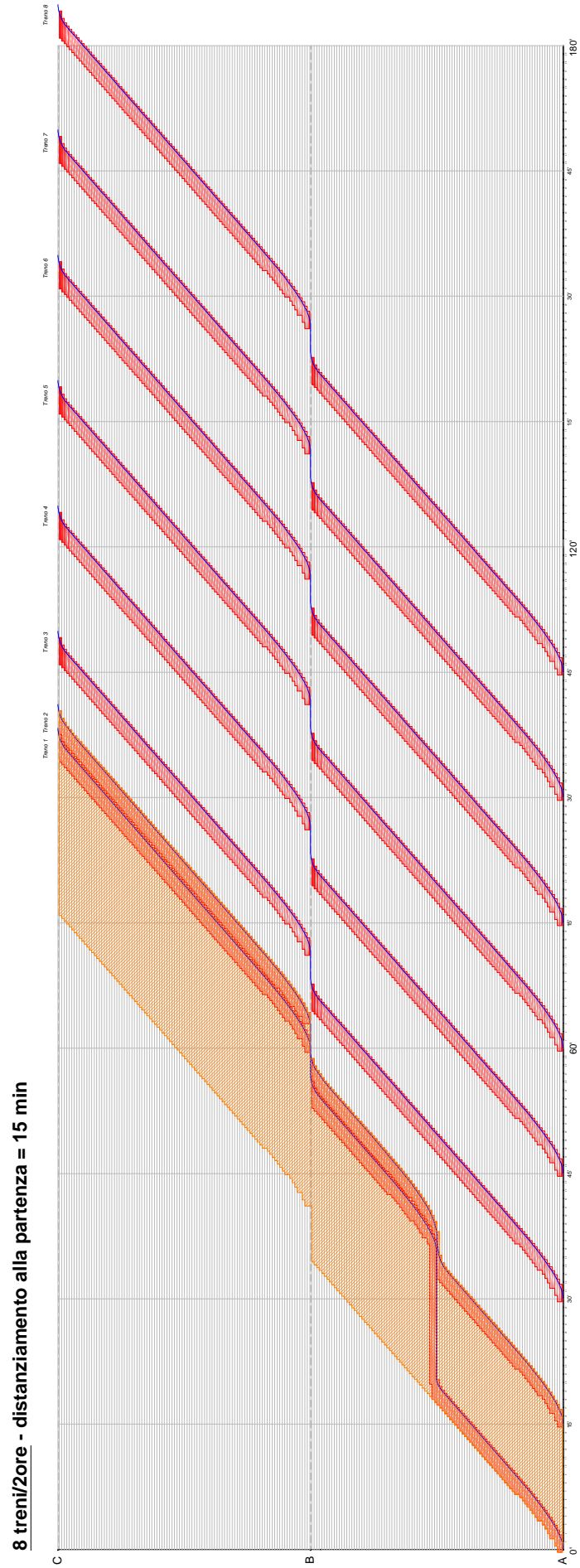


ALLEGATO B.4: CAPACITA' PRATICA - LINEA A.V. - B.M.

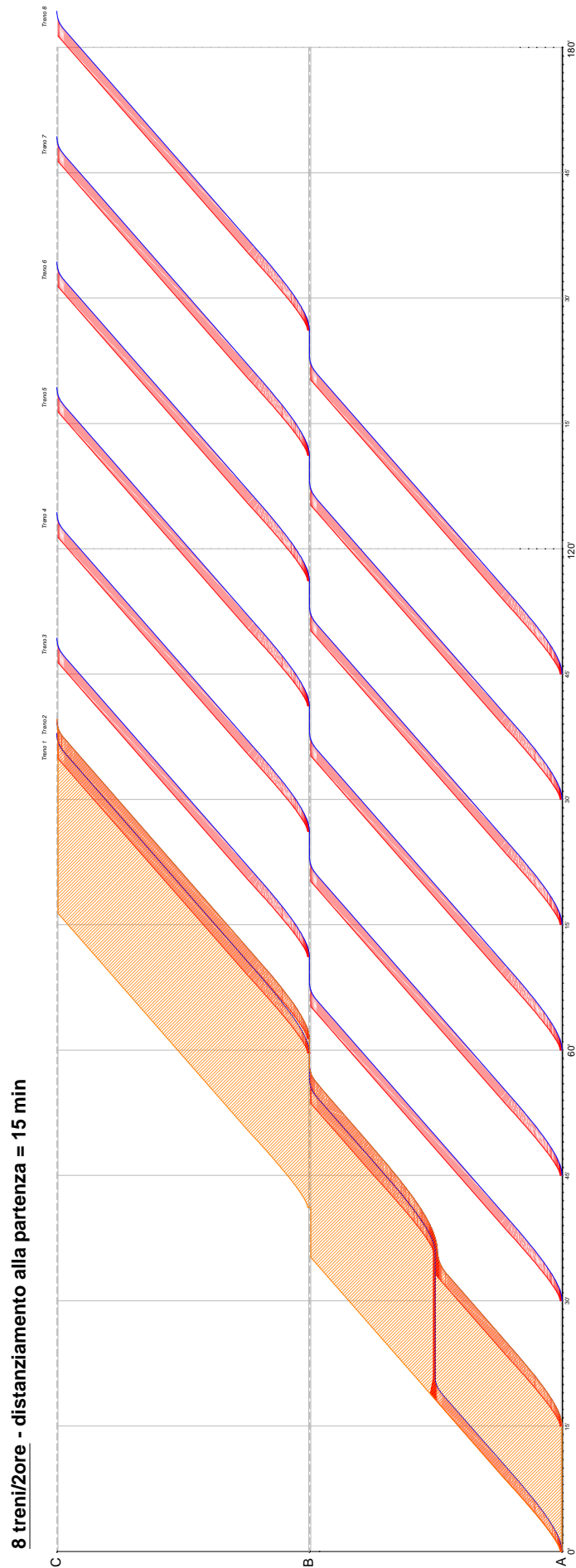
44 treni/2ore - distanziamento minimo alla partenza = 2.03 min



ALLEGATO B.5: RITARDO PRIMARIO - ORARIO ORIGINALE - LINEA A.V. - B.F.

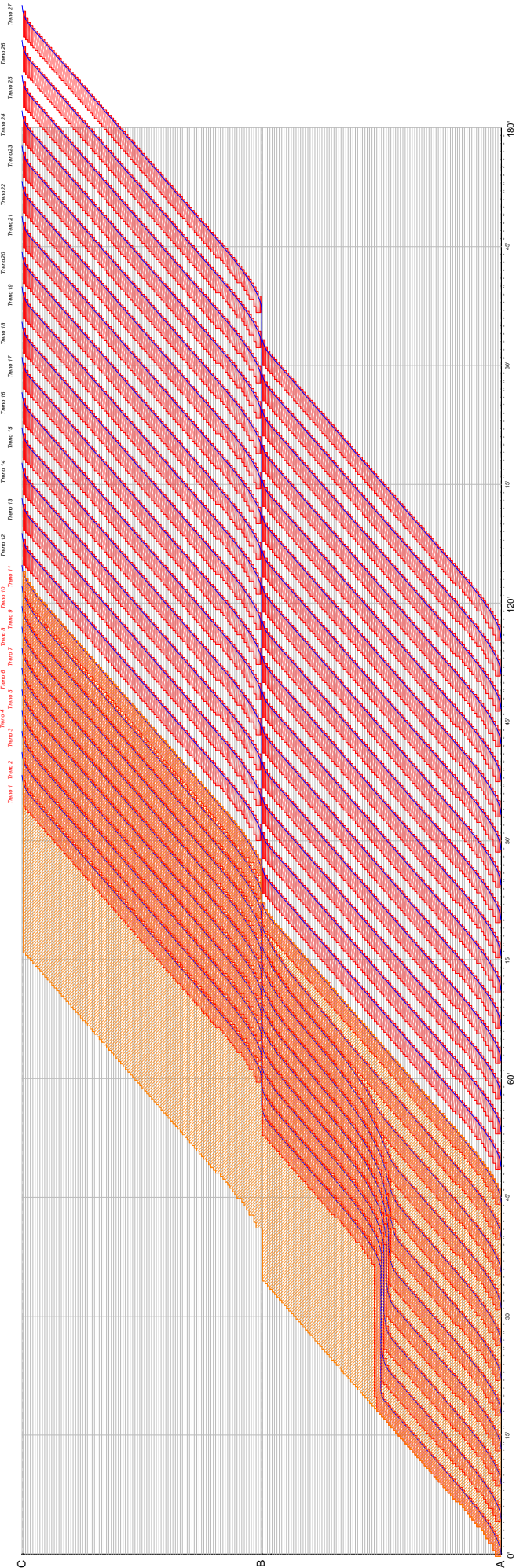


ALLEGATO B.6: RITARDO PRIMARIO - ORARIO ORIGINALE - LINEA A.V. - B.M.



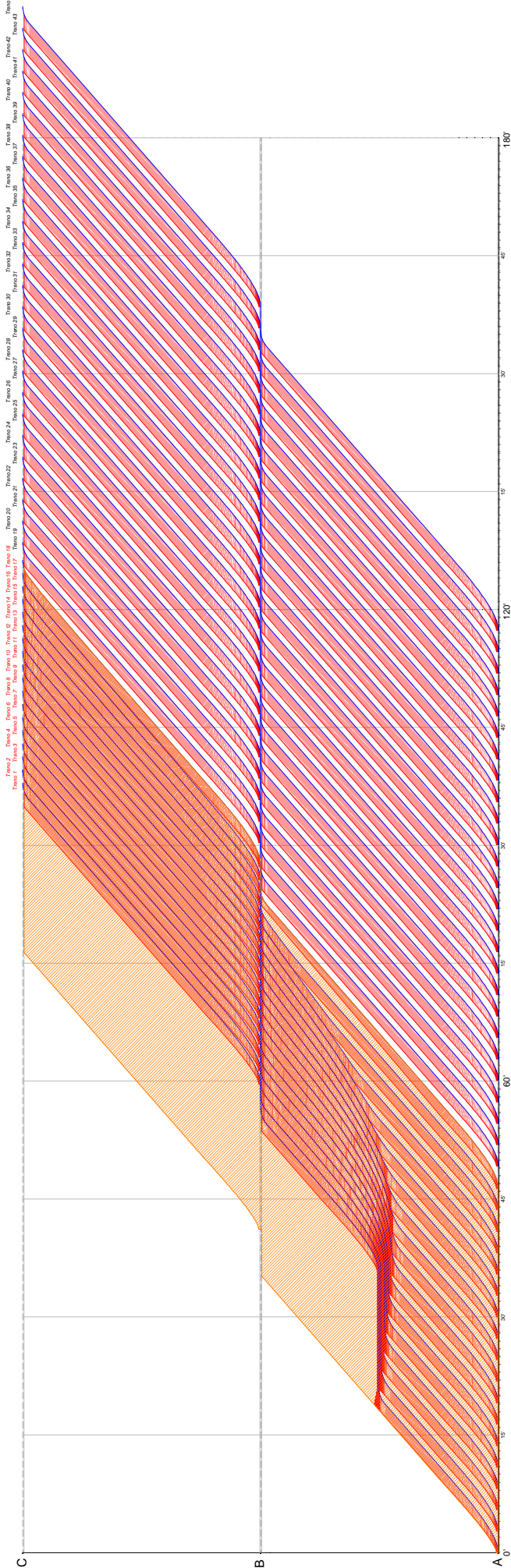
ALLEGATO B.7: RITARDO PRIMARIO - CAPACITA' PRATICA - LINEA A.V. - B.F.

27 treni/2ore - distanziamento alla partenzam = 4.44 min



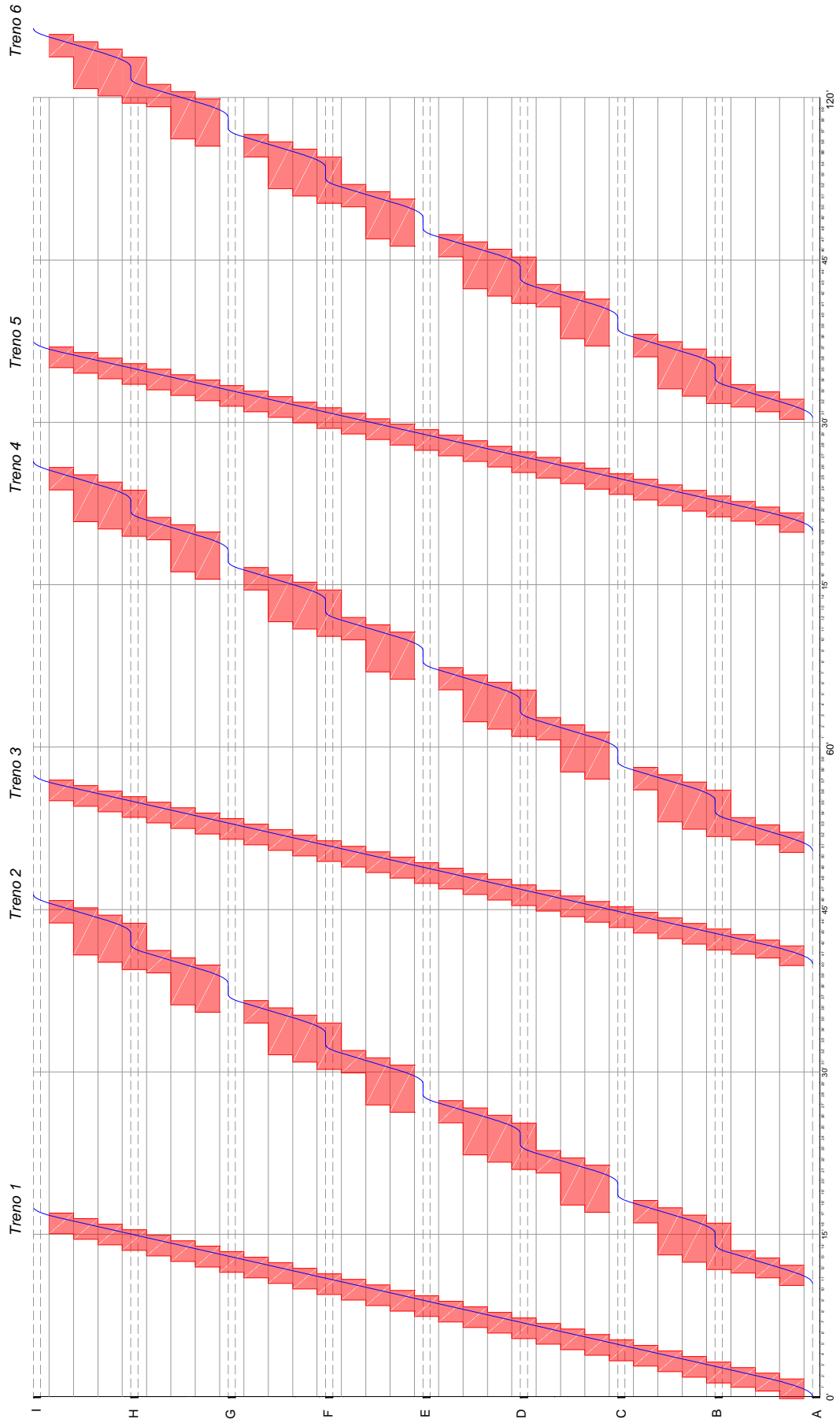
ALLEGATO B.8: RITARDO PRIMARIO - CAPACITA' PRATICA - LINEA A.V. - B.M.

44 treni/2ore - distanziamento alla partenza = 2.73 min



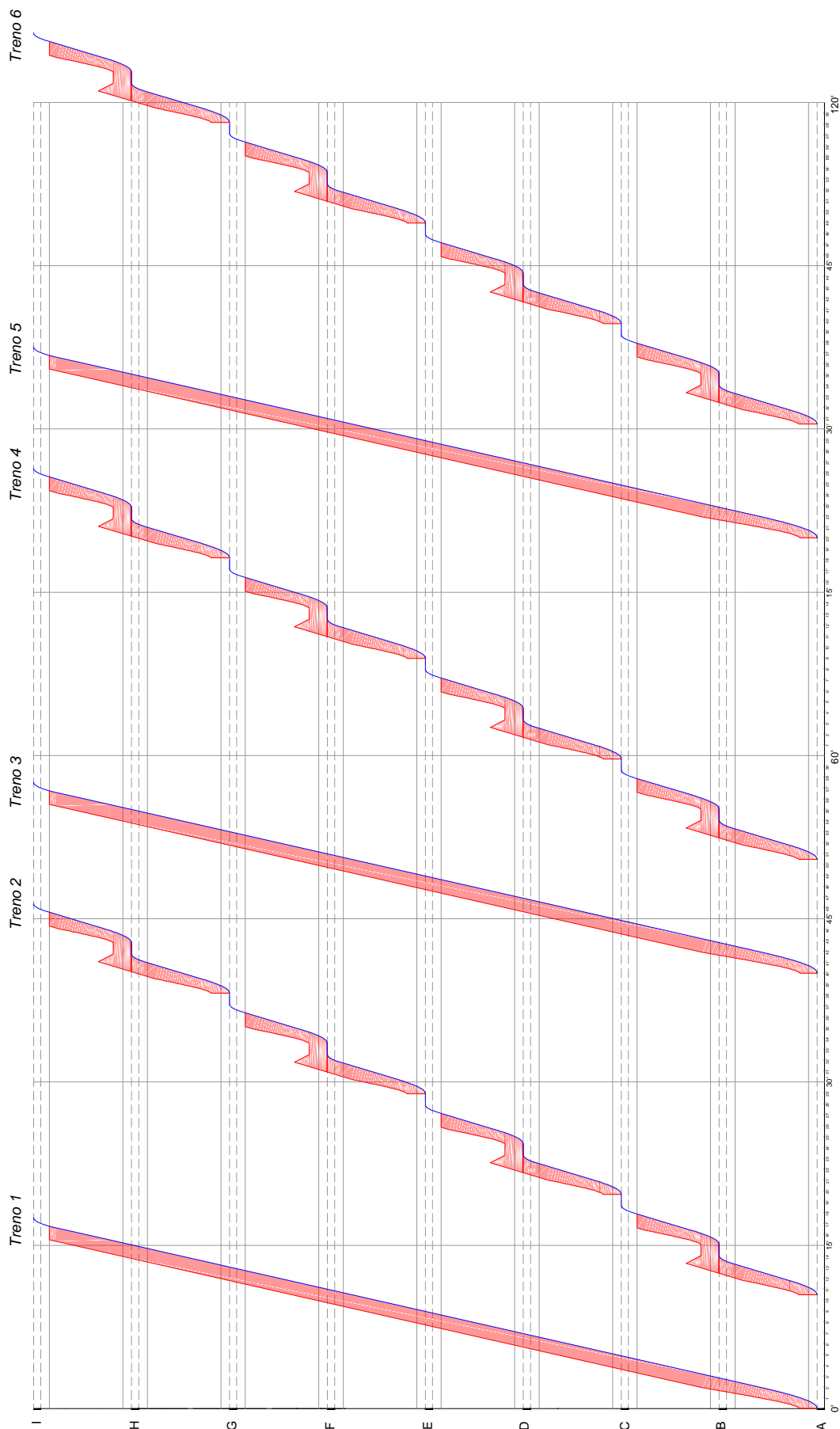
ALLEGATO C.1: ORARIO ORIGINALE - LINEA TRADIZIONALE - B.F.

6 treni/2ore - distanziamento alla partenza Eurocity/Suburbano = 10.5 min -
distanziamento alla partenza Suburbano/Eurocity = 29.5 min



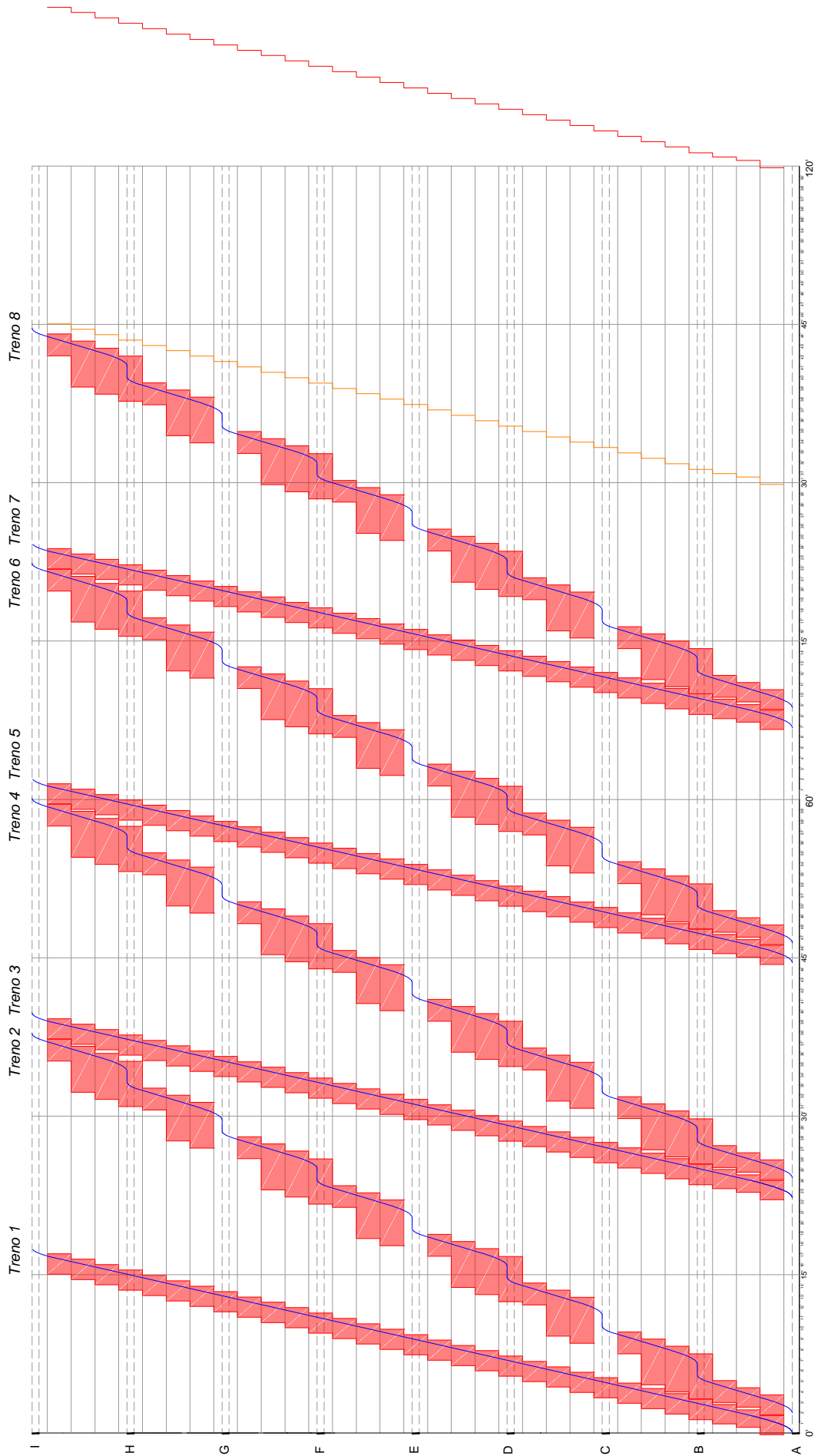
ALLEGATO C.2: ORARIO ORIGINALE - LINEA TRADIZIONALE - B.M.

6 treni/2ore - distanziamento alla partenza Eurocity/Suburbano = 10.5 min -
distanziamento alla partenza Suburbano/Eurocity = 29.5 min



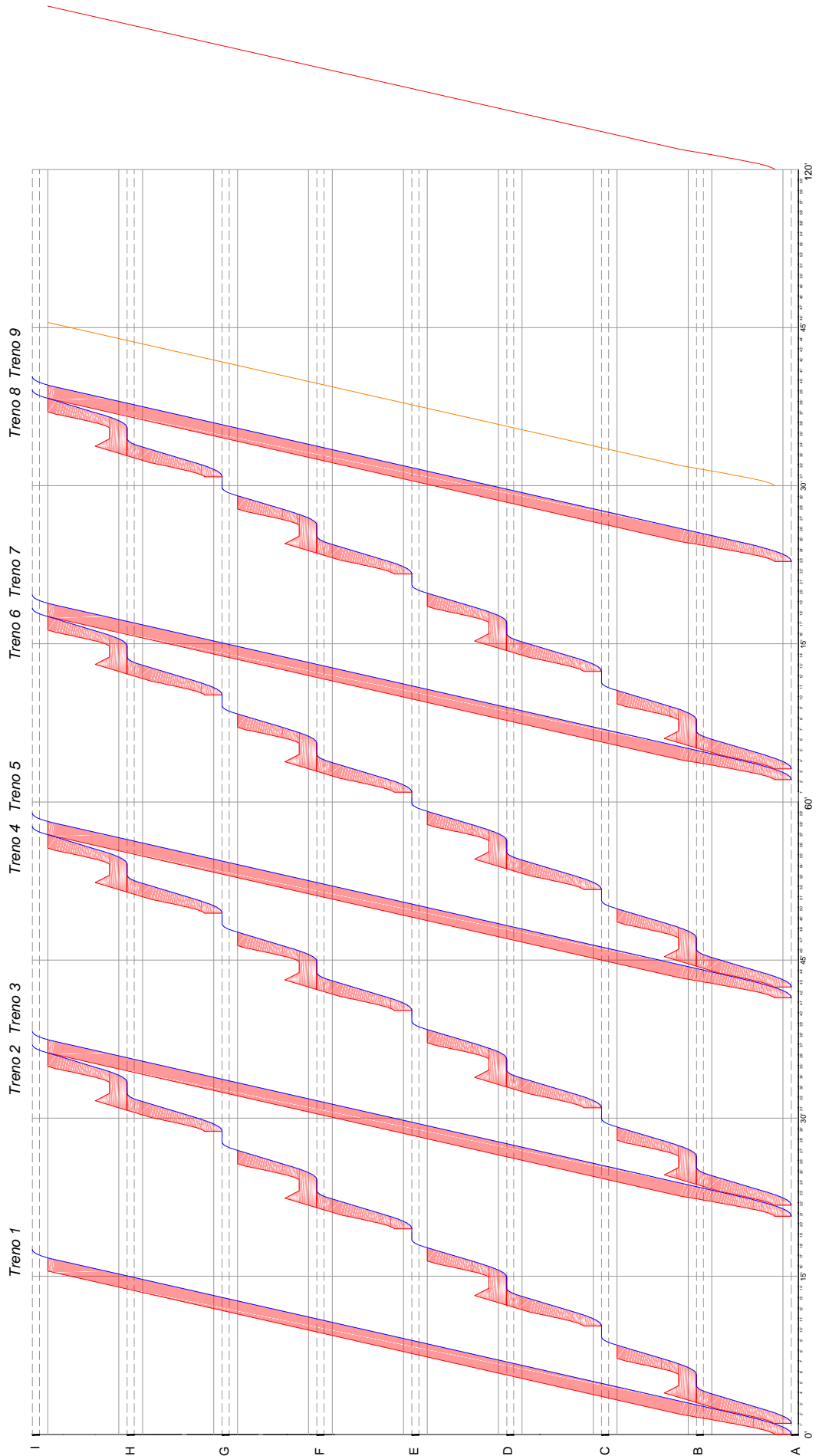
ALLEGATO C.3: CAPACITA' PRATICA - LINEA TRADIZIONALE - B.F.

8 treni/2ore - distanziamento minimo alla partenza Eurocity/Suburbano = 1.90 min -
distanziamento minimo alla partenza Suburbano/Eurocity = 20.37 min



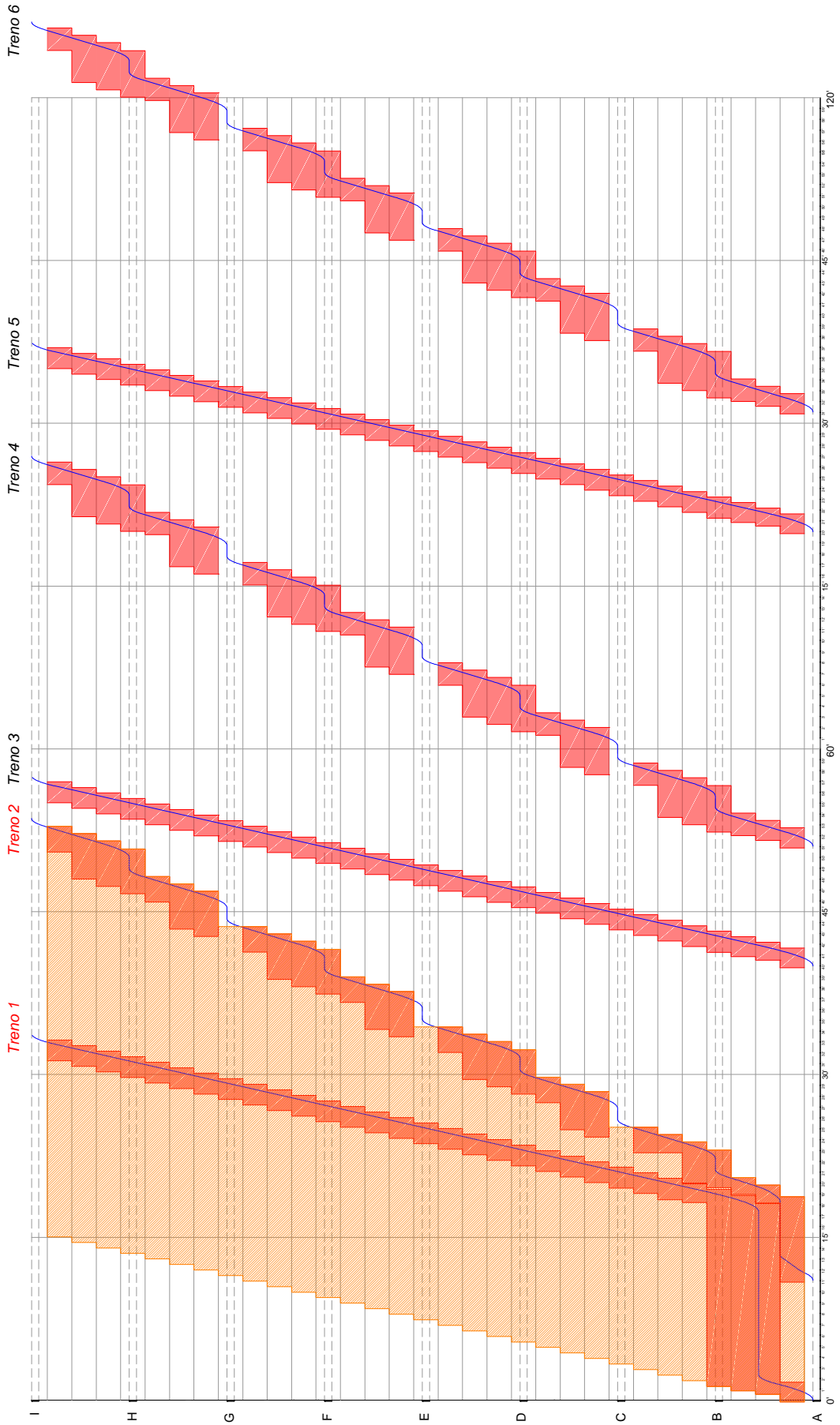
ALLEGATO C.4: CAPACITA' PRATICA - LINEA TRADIZIONALE - B.M.

9 treni/2ore - distanziamento minimo alla partenza Eurocity/Suburbano = 1.03 min -
distanziamento minimo alla partenza Suburbano/Eurocity = 19.67 min



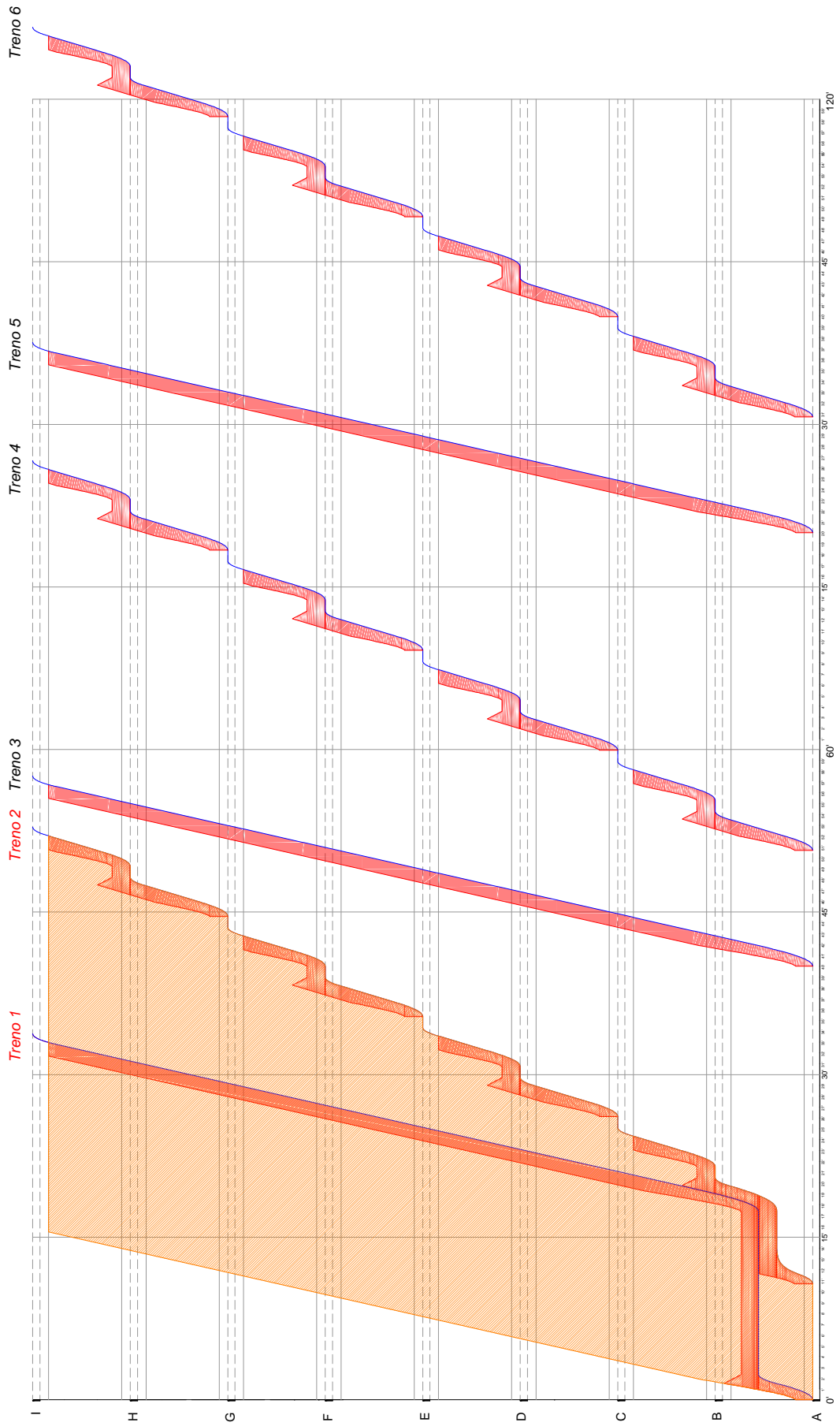
ALLEGATO C.5: RITARDO PRIMARIO - ORARIO ORIGINALE - LINEA TRADIZIONALE - B.F.

8 treni/2ore - distanziamento alla partenza Eurocity/Suburbano = 1.90 min -
distanziamento alla partenza Suburbano/Eurocity = 20.37 min



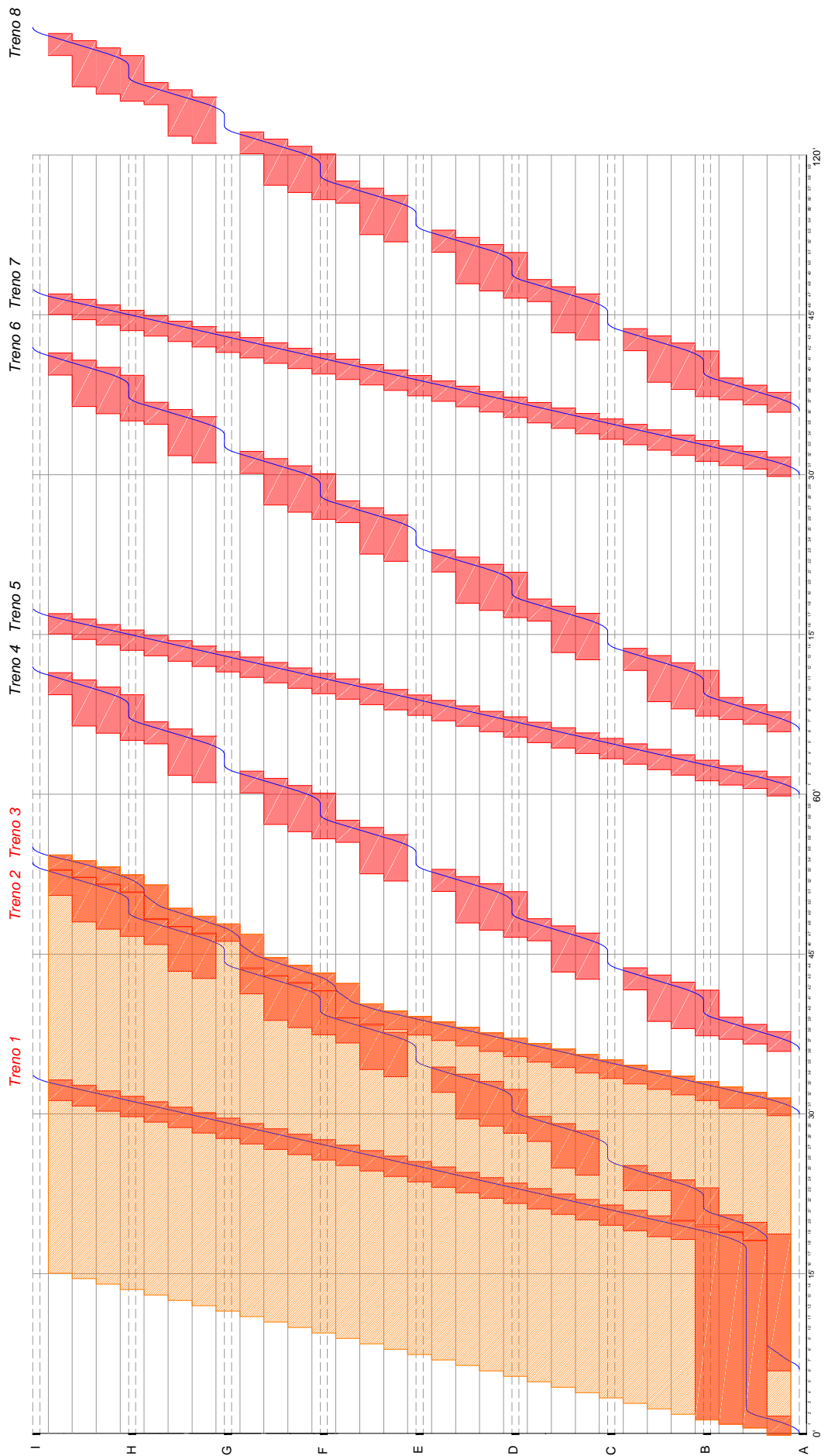
ALLEGATO C.6: RITARDO PRIMARIO - ORARIO ORIGINALE - LINEA TRADIZIONALE - B.M.

9 treni/2ore - distanziamento alla partenza Eurocity/Suburbano = 1.03 min -
distanziamento alla partenza Suburbano/Eurocity = 19.67 min



ALLEGATO C.7: RITARDO PRIMARIO - CAPACITA' PRATICA - LINEA TRADIZIONALE - B.F.

8 treni/2ore - distanziamento alla partenza Eurocity/Suburbano = 1.90 min -
distanziamento alla partenza Suburbano/Eurocity = 20.37 min



ALLEGATO C.8: RITARDO PRIMARIO - CAPACITA' PRATICA - LINEA TRADIZIONALE - B.M.

9 treni/2ore - distanziamento alla partenza Eurocity/Suburbano = 1.03 min -
distanziamento alla partenza Suburbano/Eurocity = 19.67 min

